НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА
„ЧЕЛОВЕК и ВСЕЛЕННАЯ“

П2 F221

МАРИЯ КЮРИ

РАДИОАКТИВНОСТЬ

„ЗЕМЛЯ и ФАБРИКА“
Москва 1925 Ленинград

III 2 F 24

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА
„ЧЕЛОВЕК и ВСЕЛЕННАЯ“

Мария Кюри

РАДИЙ
РАДИОАКТИВНОСТЬ
и
СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

СБОРНИК
ИЗБРАННЫХ СТАТЕЙ

В честь
великой исследовательницы

С приложением речи Жана Перрэна на торжественном заседании в Сорбонне 26/XII 1923

Под редакцией и с предисловием
проф. Н. А. ШИЛОВА

1259/25

„ЗЕМЛЯ и ФАБРИКА“
Москва 1925 Ленинград

С.С.С.Р. ИНСТИТУТ К. Маркса и Ф. Энгельса Ц. И. К.

355088 ч

Главлит № 29495. Москва. Тираж 3.000

Типография „ГУДОК“, ул. Станкевича, 7.

M. Curie

ОТ РЕДАКТОРА

Мария Кюри[1]) завоевала себе почетное место среди пионеров человеческой мысли, ее имя тесно связано с ве-

---

[1]) Мария Склодовская (впоследствии Кюри) родилась 7-го ноября 1867 г. в Варшаве. Отец ее был учителем физики в гимназии. Мать ее умерла рано. Отец был увлеченным сторонником естественно-научного миросозерцания и на скудный заработок ставил физические опыты, при чем в уборке его скромной лаборатории ему помогала дочь, получившая здесь первый интерес к науке. Детство и юность Марии совпали с трудным временем для Польши, и девушка принимала деятельное участие в революционных кружках. Недовольство обстановкой полицейского гнета принудило Марию покинуть свою родину. Сначала она предполагала поступить в Краковский университет, но там ей посоветовали „заняться лучше на кулинарных курсах“, что заставило ее искать гостеприимства в Париже. 20 лет от роду она начала самостоятельную жизнь без денег и без связей. Она устроилась в скромной комнатке на чердаке и довольствовалась скудным питанием на 10 сантимов в день, зарабатывая их частными уроками, а позднее уборкой и мытьем посуды в лаборатории в Сорбонне (Парижский университет).

ликой химической революцией, вызванной открытием и исследованием радиоактивных сил. Девятнадцатый век в истории химии был временем постепенной эволюции идей, планомерного завоевания и закрепления научных достижений. После первой химической революции, толчок к которой был дан, главным образом, мыслями и работами Антуана Лорана Лавуазье, последовал период спокойной научной работы. Но в конце столетия (1896 г.) Анри Беккерель сделал свое замечательное открытие,—наблюдал маленькое темное пятнышко на фотографической

Научные занятия Марии обратили на себя внимание физика Габриэля Липпманна и математика Анри Пуанкаре, и она начала работать под руководством Пьера Кюри.

Совместная работа повела к личным отношениям, которые в 1895 году завершились браком. Семейная жизнь и рождение дочерей Ирины и Эвы нисколько не помешали научным занятиям Марии Кюри, и в три года она сдала выпускные экзамены по математике и физике и начала самостоятельные научные исследования. Вскоре после этого начинаются работы Марии Кюри над новооткрытыми радиоактивными излучениями; к работе присоединился и ее муж, но в начале 1906 года он трагически погиб на улицах Парижа под колесами грузовой повозки. Мария Кюри, потеряв научного друга и сотрудника, продолжала свое служение науке.

Научная деятельность М. Кюри нашла себе заслуженную оценку среди ученых. Она дважды удостоилась премии Нобеля (по физике и по химии), состоит профессором Сорбонны и имеет в своем заведывании прекрасно оборудованный институт для радиологических исследований.

пластинке, вызванное непонятным влиянием препаратов урановых соединений. Этому загадочному наблюдению суждено было с головокружительной быстротой, в чисто революционном темпе, в какие-нибудь 5—10 лет перестроить все наши основные положения не только в узких пределах химии, но во всем нашем научном миросозерцании, в наших взглядах на природу, генезис, стихийную судьбу материи и миров и на строение атома до самых его недр. Изучение радиоактивных сил развернуло перед нами такие широкие горизонты и перспективы, до которых еще не задолго до того не решалась доходить самая смелая научная мечта.

Разработка науки о радиоактивных силах является, пожалуй, более, чем какая-либо иная отрасль знания, результатом коллективного творчества, не знающего границ стран и государств. Открытия следовали друг за другом, исправляли, дополняли, подтверждали, подхватывали и опережали друг друга, с быстротой мысли перескакивая из Франции (Беккерель, Мария и Пьер Кюри, Дебиерн) в Англию (Дж. Дж. Томсон, Рамсэй, Брагг, позднее Рэтерфорд и Содди), в Америку (Рэтерфорд, Больтвуд) и в Германию (Гизель, Ган, Марквальд, позднее Фаянс). Уже теперь, едва через 15—20 лет, начинают сливаться отдельные эпизоды, открытия и наблюдения, имевшие в свое время громадное значение и послужившие важными звеньями в цепи научных заключений и выводов, которые нам кажутся внушенными самой природой и ясными до очевидности. Однако то, что внесено в науку Марией Кюри, не сливается

с общим, хотя бы и ярким, фоном. Ее имя стоит везде в самом заголовке всех главных вопросов радиологии, и, особенно на первых порах, ее опыты всегда служат затравкой дальнейших исследований, не давая ходу научных событий задерживаться ни на минуту,— они красной нитью намечают передовой путь завтрашнего научного дня. Напомним в самых общих контурах главнейшие из начальных этапов в развитии учения о радиоактивности.

Беккерелем открыта радиоактивность урана, им же и другими учеными (Гизель, Мейер, Швейдлер, Рэтерфорд, Брагг) намечены типы лучей, наблюдено их рассеивающее действие на электрический заряд, установлена их материальная природа, связанная с сущностью самого атома, открыто отклонение лучей в электромагнитном поле. Все это на протяжении 2 — 3 лет (1896 — 1899 г.г.). Эти факты уже глубоко проникают в область неведомого и таинственного. Но можно сказать с уверенностью, что дальнейший ход открытий был бы обречен на более медленный темп, если бы исследования радиоактивности должны были ограничиться соединениями урана. Необходимо было расширение возможностей и более удобный экспериментальный материал с более сильной радиоактивностью. В поисках такового М. Кюри (независимо от Шмидта) устанавливает радиоактивность соединений тория (1898 г.), — принципиально в высшей степени важный факт, показавший, что уран не единственный в своем роде. Но в практическом отношении это открытие прибавляет сравнительно мало, так как радио-

активность тория того же порядка, как и радиоактивность урана. Мария Кюри поэтому не остановилась в своих поисках, и в результате планомерной научной мысли, громадной энергии, неутомимой выдержки, после тысячи отрицательных или неудачных опытов, путем кропотливой работы, одухотворенной ясно намеченной целью, в результате труднейших в экспериментальном отношении операций, приводящих от тонн исходного материала к долям грамма искомого продукта, были открыты полоний и тот элемент, который в минуту счастливой инспирации был назван радием и которому суждена была такая блестящая судьба в истории науки[1]). Некоторые наблюдения, которые, пользуясь ураном или торием, потребовали бы нескольких человеческих жизней, стали возможными в несколько дней и даже часов, а наблюдаемые величины возросли в миллионы раз, изменив этим самую единицу времени для научного исследования радиоактивных явлений.

Радиоактивные силы, заметные вначале лишь при наблюдениях с помощью точных приборов и требующие долгих повторных измерений, стали доступны невооруженному глазу целой аудитории; они из узких пределов специаль-

---

[1]) Первыми по этому вопросу были напечатаны статьи: P. Curie et M-me Curie. Comptes rendus. Июль 1898 и P. Curie, M. Curie et G. Bémont там же, декабрь 1898. В первой из этих статей вводится термин: «радиоактивность»; до тех пор новооткрытые лучи назывались «урановыми» или «Беккерелевскими».

ных лабораторий вышли на широкий простор общего интереса для всего культурного мира. В этом величайшая заслуга М. Кюри, отмеченная нобелевской премией.

После открытия радия скоро была установлена его химическая природа, его спектр, атомный вес, его место в периодической системе, были выработаны методы его получения в относительно больших количествах и в виде чистых препаратов. Во всей этой работе, которая ведется позднее целым рядом ученых, Кюри принимает самое деятельное участие и занимает первое место. Радий из таинственного химического незнакомца становится вполне определенным элементом — полноправным членом семьи щелочноземельных элементов (*Be, Mg, Ca, Sr, Ba*).

Но возникает далее вопрос, какова судьба самих радиоактивных атомов при их непрерывном материальном излучении. Толчок вперед и здесь дает опыт Кюри, который теперь для нас кажется элементарным и упоминается лишь в научной азбуке. Помещая раствор соли радия в замкнутом пространстве, Кюри наблюдала, что все предметы в этом пространстве, даже не подвергающиеся непосредственному действию радиоактивных лучей, приобретают временную радиоактивность, которая получила название «наведенной» (индуцированной). Этот факт ведет прямо к открытию газообразной эманации радия. Несколько позднее была точно установлена (Рэтерфорд, Рамсэй и др.) ее природа, как благородного газа со всеми свойствами, присущими его сочленам по группе (*He, Ne, Ar, Kr, Xe*), с определенными: точкой кипения, коэффициентом диффузии,

плотностью, атомным весом и с резко выраженными радиоактивными свойствами. Этим определился первый этап распада атомов радия. Исследуя далее индуцированную радиоактивность в различных условиях, К ю р и устанавливает два ее типа: быстро преходящую и остаточную, характеризующуюся медленным падением своей интенсивности.

К этому времени экспериментальный материал по новой отрасли науки — радиологии — уже сильно разросся, и дальнейшее развитие ее не могло довольствоваться накоплением фактов, — требовалась та или иная рабочая теория, то или иное обобщение, которое позволило бы сознательно искать новых данных, осветив и пройденный путь. Такое обобщение принесла с собой теория распада атомов, которая связывается обычно всецело с именем Р э т е р ф о р д а и его учеников. Действительно, эта теория облеклась в плоть и кровь трудами этой школы, однако справедливость требует отметить, что первая мысль о том, что при материальных излучениях должны изменяться сами атомы, была высказана М. К ю р и в ее статье в Revue générale des Sciences (30-го января 1899 года). Это было первым в литературе зародышем мысли о превращении элементов при радиоактивных явлениях. Мысль была тотчас же подхвачена в науке и, помимо принципиальных вопросов кардинальной важности и интереса, выдвинула конкретную задачу — определить точную последовательность рождающихся и исчезающих элементов, сомкнув отдельные звенья цепей, начальным или конечным членом

которых является радий. Одним из методов исследования служили наблюдения за изменением во времени радиоактивности эманации радия и образующегося из нее радиоактивного осадка («индуцированной и остаточной радиоактивности»). Эти опыты приводят вообще к сложному клубку кривых, распутать которые могут лишь точнейшие экспериментальные измерения и глубокий математический анализ. И в том, и в другом с первых шагов принимает деятельное участие Кюри и вносит этим свою лепту в постепенное выяснение серии превращения радия с его потомками. Эта трудная научная работа, завершенная коллективным творчеством многих ученых на сериях урана, тория и актиния, привела, как известно, к открытию явления изотопии, к пересмотру периодического закона и самого понятия об элементе, а также к возможности научного освещения вопроса о строении атома в самом его сердце.

Параллельно с этими принципиальными вопросами М. Кюри приходилось участвовать в разрешении и других важных задач в области радиологии. Ею с большими экспериментальными затруднениями был получен радий в виде свободного металла, были изучены свойства этого последнего и окончательно рассеяно сомнение скептиков в его химической индивидуальности. Далее Международный Конгресс радиологов в Брюсселе поручил М. Кюри изготовление эталона радия, необходимого для точных радиоактивных измерений. Эталон этот был изготовлен, и в честь супругов Кюри единица радиоактивной силы получила название «кюри» или «милликюри».

Самый эталон нашел себе почетное место в Париже рядом с эталонами метра и килограмма. Эти последние связаны с величайшими именами Лавуазье, Лапласа, которым были поручены подготовительные работы по введению метрической системы во Франции одним из первых декретов Конвента в период Великой Французской Революции.

Эталон радия всецело связан с именем Кюри. Этой работой она оставляет по себе материальную память, которая сохранится пока существует приготовленный ею радий, т.-е. десяток тысяч лет. Но с этим образцом радия должна соединяться не менее долговечная память о той научной работе, которая повела к его созданию и возвысилась до величайших образцов научного творчества. Перед нами красивый полет научной мысли, охватывающий вершины знания и горизонты нескольких поколений и оставляющий за собой самые смелые научные мечты. Отдельных эпизодов его хватило бы на несколько жизней, чтобы снискать им благодарное признание цивилизованного мира.

Н. Ш.

Октябрь 1924 г.

Жан Перрэн

Мария Кюри и открытие радия [1])

В легендах сохранилось смутное воспоминание о чуде, даровавшем нашим отдаленным предкам победу над огнем. Внезапно они стали равными богам, которые были созданы их чувством страха, и сделались полными хозяевами нашей планеты. Зарождалась цивилизация, наступало царство человека.

Столь же великое чудо совершается, быть может, и сейчас, на наших глазах: еще одно поколение—и наше существование, вероятно, будет казаться нашим внукам таким же жалким и беспомощным, каким нам кажется сейчас жизнь, длившаяся в продолжение тысячелетий, без защиты от холода и ночи, среди громадных лесов, наполненных ужасами.

Это чудо возбуждает самые смелые надежды, и недавние успехи науки их уже оправдывают. Вы, несо-

---

[1]) Речь, произнесенная 26 декабря 1923 года в большой аудитории Сорбонны по случаю 25-тилетия со времени открытия радия.

менно. уже слышали, что в течение последних лет физика чрезвычайно расширила свои владения и свое могущество.

Успехи радиоактивности и дают нам представление об этом перевороте.

Можно сказать, что он начался с открытия тех явлений, которые совершаются при электрическом разряде в пустоте.

При таком разряде поток электронов, отрицательных частиц, невообразимо малых и легких, отделяется от отрицательного электрода, который отталкивает их с такой силой, что скорость их может превысить 100.000 клм. в секунду. Когда этот поток электронов, несущихся с невероятной скоростью, наталкивается на какое-либо препятствие, то последнее начинает испускать совершенно особого рода лучи. Это те самые X-лучи, открытие которых возбудило столько удивления; они проникают (разумеется, ослабляясь) через все экраны и действуют на фотографические или флуоресцирующие пластинки. Вы знаете, что они не претерпевают ни отражения, ни преломления, что они сообщают газам проводимость или, иначе говоря, «ионизируют» их. Это происходит потому, что иногда, встречаясь с молекулами, они отрывают от них электроны, совершенно тождественные с теми, удары которых были причиной их возникновения.

Все эти явления — необычайны, но, в конце-концов, они подвластны нам. ибо электрический разряд появляется

и исчезает по нашей воле. Изучение их привело к гораздо более важному открытию такого произвольного излучения, которое, повидимому, непрерывно наблюдается у некоторых тел. Мы обязаны этим открытием Анри Беккерелю.

Заметив, что стенки трубок, где происходит разряд, фосфоресцируют, он задал себе вопрос, не возникают ли и при всякой вообще фосфоресценции X-лучи. Вывод неверный, но логичный, который одновременно был высказан Анри Пуанкарэ. Как это часто случается, важным оказалось то, что при этом был задуман и осуществлен новый опыт.

Производя исследование многих фосфоресцирующих тел, Анри Беккерель испытал различные соли урана, обладающие чрезвычайно сильной фосфоресценцией, и нашел, что они действительно испускают слабые лучи, которые при длительной экспозиции способны действовать на фотографические пластинки, завернутые в черную бумагу или в тонкие листочки металла, а также ионизировать газ, сообщая ему слабую проводимость.

Сначала он старался как можно сильнее освещать активные соли, но скоро он заметил, что такое освещение совершенно не нужно и что даже, если их защищать долгое время от всякого света вообще, то все вещества, содержащие уран (включая и те, которые не обнаруживают никакой видимой фосфоресценции, как, например, металлический уран), непрерывно испускают слабые лучи, аналогичные X-лучам.

Анри Беккерель уже в то время понял, что радиоактивность свойственна элементу урану, независимо оттого, находится ли он в соединении или нет. Но, находясь все еще под влиянием своей гипотезы, сослужившей ему такую прекрасную службу, он продолжал считать эту радиоактивность проявлением очень сильной фосфоресценции, причину которой он точно не знал. Здесь открывается новый важный этап.

Именно в это время, после нескольких лет занятий в Парижском университете, Мария Склодовская-Кюри начала свои лабораторные исследования. Если бы я не был так ограничен временем, я бы рассказал вам, как молоденькая польская студентка, привлеченная в нашу страну пламенной любовью к науке и свободе, в конце-концов, осталась среди нас, я бы рассказал вам так же, как позднее, после великих испытаний, она сумела доблестно послужить обеим своим родинам.

Сейчас нам кажется непонятным, что потребовалось более года ожиданий, прежде чем был открыт другой радиоактивный элемент, кроме урана. Это была первая работа М. Кюри, в которой тотчас же обнаружились те особые качества ее исследовательского таланта, которые впоследствии остались типичными для всей ее деятельности.

Необходимо было исследовать, конечно, все элементы один за другим. Производя эти опыты, М. Кюри находит, одновременно с Шмидтом, у элемента тория радиоактивность, аналогичную активности урана, все же остальные

элементы оказываются не радиоактивными. во всяком случае, в заметной степени.

Но М. Кюри не ограничилась наблюдением веществ, искусственно приготовленных химиками. Она изучила систематически громадное число минералов в их естественном состоянии, и это именно доказывает, что она уже тогда думала о возможности существования еще неизвестных радиоактивных элементов.

«Два урановых минерала,—писала она,—урановая смолка и халколит гораздо более активны, чем сам уран. Этот факт весьма замечателен и заставляет думать, что эти минералы могут содержать элемент гораздо более активный, чем уран. Я приготовила халколит (фосфорнокислая соль меди и урана) из чистых продуктов; этот искусственный халколит оказался нисколько не более активным, чем другие соли урана».

Это важное замечание подписано одной только М. Склодовской-Кюри, и понятно, почему я здесь его цитирую. Но с этого времени начинается совместная работа, которой в истории нет другого примера, ибо так редко, чтобы мужчина и женщина, принадлежащие к самым выдающимся людям, без всяких усилий и во всех отношениях, были бы на одном и том же уровне и так прекрасно приспособлены друг к другу, что оригинальность одного не поглотила оригинальности другого. Таков был союз Марии Склодовской и Пьера Кюри.

Будучи уже знаменитым физиком и увлекаясь перед тем отвлеченными исследованиями, Пьер Кюри понял громадный интерес тех опытов, которыми занималась его жена, и присоединился к ней, чтобы проникнуть в глубины открывающегося перед ними нового мира.

Вспомним, в какой жалкой лаборатории было произведено то открытие, которым Франция ныне гордится. Я сказал—лаборатория, правильнее было бы сказать,—просто сарай, сырой сарай, плохо вентилируемый, почти без всякой обстановки. Конечно, оба исследователя провели там изумительные часы, смотря туда, куда не проникал до тех пор ни один человеческий взор, разгадывая одну за другой тайну неведомого мира, который трепещет в недрах атомов. Но никто не может думать, что эти часы были бы менее прекрасны и менее плодотворны, если бы более могущественные средства облегчили и ускорили предпринятую работу.

Тем не менее эта работа подвигалась вперед, отличаясь той особенностью, что при химических манипуляциях приходилось следить по электрометру за постепенным нарастанием активного вещества, совершенно еще неуловимого при помощи весов. Это гипотетическое вещество, сопровождающее висмут и, несомненно, имеющее химическое сродство к нему, получило название полония. Наиболее активные из полученных препаратов оказались в 400 раз более радиоактивны, чем чистый уран.

И, наконец, следует открытие, двадцатипятилетие которого мы сегодня празднуем. Кроме полония, сопрово-

ждающего висмут. урановые минералы содержат гораздо более радиоактивный элемент, химически аналогичный барию, соли которого однако менее растворимы, что позволяет производить постепенное отделение. Были получены препараты в 1000 раз более активные, чем уран; атомный вес радиоактивного бария начал увеличиваться; появилась новая спектральная линия в искре; элемент радий был открыт.

Но он не был еще изолирован, хотя бы относительно в чистом виде. И здесь, в этой совместной работе, обнаруживается влияние Марии Кюри.

Пьер Кюри, может быть, более физик по своим интересам, интересовался преимущественно самыми свойствами излучения и, в результате, опубликовал отдельно последовательный ряд заметок, касающихся этих свойств. Как это было, повидимому, и с Анри Беккерелем, он меньше думал о необходимости тех колоссальных усилий, которые требуются для выделения нового вещества и для получения, как говорят химики, этого препарата в склянке. Эти усилия, если они и не были исключительно делом Марии Кюри, были во всяком случае вызваны ее настойчивой и упорной волей. Без преувеличения можно сказать сегодня, что именно ею заложен тот краеугольный камень, на котором покоится все здание радиоактивности.

Благодаря неутомимой работе, производившейся с такой настойчивостью и по такой системе, без которых самое живое воображение оказывается бесплодным, препараты

постепенно обогащались радием, становясь параллельно более радиоактивными, и средний атомный вес с 136 возрос до 226, на чем и остановился. Таким образом был получен, сначала только в виде чистой соли, радий, совершенно свободный от бария. Выделение самого металлического радия было произведено несколько лет спустя опять-таки **Марией Кюри**.

Радиоактивность нового элемента превзошла все, что можно было ожидать, оказавшись приблизительно в 5.000.000 раз больше, чем радиоактивность урана. Такая колоссальная радиоактивность дала возможность произвести до той поры неосуществимые исследования лучей, испускаемых радиоактивными телами. Хотя бы вкратце, я должен вам рассказать, что это за лучи.

Прежде всего, это—лучи α, которые несут почти всю испускаемую энергию (энергию столь огромную, что радий может расплавить в один час приблизительно равное ему по весу количество льда). Эти лучи суть траэктории материальных ядер, выбрасываемых со скоростью, превышающей 20.000 клм. в секунду; ядер, гораздо более тяжелых, чем электроны, и которые в действительности оказываются атомами гелия. Их энергия так велика, что при своем ударе о сернистый цинк они вызывают сцинтилляции (вспышки или блестки), которые видны в лупу и которые столь же быстро исчезают, как и появляются.

Во-вторых, это—лучи β, траэктории электронов, тождественных с электронами отрицательных лучей при электри-

ческом разряде, но выбрасываемых с гораздо большей скоростью, которая может превысить 200.000 клм. в секунду, приближаясь к скорости света, но не достигая ее.

И наконец, это — γ-лучи, аналогичные X-лучам, но более проникающие. Я напомню вам кстати, что X-γ-лучи и γ-лучи представляют собой настоящие световые лучи, периодические, как и наш видимый свет, но с периодами более короткими, — на несколько октав выше известного нам ультрафиолетового света.

Согласно их «музыкальной высоте» и их периоду, эти лучи обладают каждый своими особыми свойствами. Это именно они, вместе с проникающими β-лучами, благодаря целому потоку невидимой фосфоресценции и непрерывной ионизации, действуют на живую материю. Новое непредвиденное чудо, последствия которого только-что начинают обнаруживаться.

Именно в этом, как вы знаете, кроется главная причина практического значения радия, элемента слишком редкого, от которого тщетно еще ищут исцеления столько необлегченных и неизлечимых страданий. И, конечно, здесь уместно сказать вам, если вы не знаете, что Мария Кюри уже давно принесла в дар своей лаборатории,—когда никакая компенсация не казалась возможной или вероятной,—радий, который она приготовила на одном заводе, вне лаборатории, который был ее личной собственностью и стоил тогда, приблизительно, миллион, — дар великий и достойный благодарности всего человечества.

И нельзя было не сожалеть о том, что та, без которой этого достояния вовсе не существовало бы, не только сама от него ничего не имеет, но даже ничем от него не могла воспользоваться для своей лаборатории, где могли бы возникнуть новые источники общего богатства. И если мы чувствуем благодарность к нашим американским друзьям за то, что они это поняли и щедро предоставили нашему радиеву институту один грамм драгоценного вещества, то мы должны помнить всегда, что без М. Кюри радия совсем бы не существовало.

Я думаю, вы простите меня, что я, повидимому, отвлекся от моей темы; с вашего позволения, я возвращаюсь к чистой науке.

Я уже говорил вам, что радиоактивные вещества кажутся неисчерпаемыми источниками энергии. Но мы не думаем, что эта энергия возникает самопроизвольно. Отыскивая ее происхождение, нам удалось проникнуть глубоко в скрытую структуру материи.

Уже с давних пор предполагалось, а в недавнее время установлено бесспорно, что материя состоит из атомов стольких видов, сколько существует элементов,—из атомов, которые остаются неизменными при всяких химических превращениях.

Но о том, что находится там, внутри этих атомов, неизменная простота которых казалась вечным пределом возможного, об этом не было у нас никакого представления. И вот теперь радиоактивность открывает в них чудесное движение миров, не имеющих границ. Каждый

из атомов оказывается планетарной системой в миниатюре: вокруг положительного солнца, центрального ядра необычайной плотности, в котором сосредоточена почти вся атомная материя, вращаются на относительно громадных расстояниях отрицательные «планеты», всегда одного и того же рода, те самые электроны, которые при разряде могут отрываться от материи.

Эти скопления «планет» защищают атом и определяют его свойства, так что два атома, в которых число этих «планет» одинаково, имеют и свойства практически одинаковые, даже если ядра их и различны. Все это до тех пор, пока они сохраняются в целости. У радиоактивных же элементов ядро может быть обнаружено не только тем, что оно удерживает вращающиеся вокруг него электроны.

Благодаря правильно повторяющейся случайности, определяющей среднюю продолжительность жизни ядра, оно может взрываться, раскалываясь на новые ядра, которые в свою очередь могут распадаться. Таким, именно, образом кажущиеся неизменными для короткого наблюдения и в действительности неизменные в продолжение около 2.000 лет атомы радия взрываются один за другим, раскалываясь на два осколка, которые разбрасываются взрывом в противоположные стороны. Один из этих осколков есть атом гелия, несущийся со скоростью приблизительно 20.000 клм. в секунду в форме α-лучей. Другой, более тяжелый и более медленный, образующий «луч остатка», есть атом эманации. Эта эманация, — инертный газ, аналог аргона, — в свою очередь

радиоактивна, каждый из ее атомов распадается после средней продолжительности жизни, равной приблизительно 4 дням, выбрасывая снова быстро несущийся атом гелия (α-луч) и другой атом, опять-таки радиоактивный. Так совершается ряд произвольных превращений: ядра последовательно выбрасывают новые положительные ядра (а иногда электроны, дающие β-лучи), вплоть до конечного атома, который оказывается обыкновенным свинцом и кажется нам неизменным.

Эти превращения ускользают от нашего влияния, как ускользает от наших наблюдений противоположный процесс, который группировал бы легкие атомы в более тяжелые. Сможем ли мы когда-нибудь вызвать по нашему желанию такого рода превращения?

Может быть. И народный инстинкт в сущности вовсе не так сильно обманывается, когда ждет от нас «философского камня»—символа единства материи.

Для превращения элементов, для получения из них хотя бы самых легких, нам нужно разрушить ядра, скрывающиеся в недрах атома, где парят еще неизвестные нам законы. Как бы груб ни был этот метод, но возможно, что мы сможем это осуществить сильной бомбардировкой соответствующими снарядами.

Это именно и удалось сделать великому английскому физику Резерфорду. Достаточно быстро несущаяся и удачно направленная α-частица может разбить атом алюминия или фосфора и выбить из них атом водорода, заряженный энергией, превышающей ту, которую несла сама

α-частица. Таким образом, при этом произвольно вызванном взрыве происходит освобождение энергии, которая хранилась в ядре для нас недоступном. И мы приходим к убеждению, что, может быть, вся материя состоит из ядер водорода (или протонов) и электронов; может быть, протоны и электроны это—те универсальные элементы, пока еще неизменные и нераздельные, из которых построен весь материальный мир.

Прекрасные опыты Рэтерфорда касаются пока лишь ничтожнейших количеств, но нам не кажется невозможным, что в будущем с помощью атомной бомбардировки мы сможем превращать огромные количества материи.

Мы можем надеяться, что осуществим это лучше и в большем масштабе, чем это делают лучи радия, если более поработаем над достижением высоких электрических потенциалов. Заряженные атомы, которые относительно редко выбрасываются радием, могли бы приобрести ту же самую скорость, если бы, не ожидая взрыва, который их выбрасывает, они приводились бы в движение действием 6—7 миллионов вольт. При этом мы могли бы выбрасывать их в большем количестве. В технике уже достигли миллиона вольт; осуществление в десять раз большего напряжения не представляется столь отдаленной целью. Я полагаю, что мы сможем, напр., осуществить старую честолюбивую мечту,—получить атомы золота, исходя из более тяжелых атомов свинца. Большинство из этих процессов распада будет, вероятно, иметь характер взрыва,

подобно тому, как это наблюдается у фосфора, и мы, вероятно, получим обратно несравненно большее количество энергии, чем нами будет предварительно затрачено.

Еще более значительным прогрессом, конечно, весьма отдаленным, но, тем не менее, и весьма желательным, будет реализация тех условий, при которых легкие атомы водорода уплотняются в более тяжелые, освобождая при этом такое количество тепла, которое сделает понятным свет солнца и звезд.

Тогда действительно мы станем властителями тех колоссальных запасов энергии, которые таятся в недрах материи, подобно дремлющим гигантам. И во второй раз античный Прометей похитит пламя с неба.

В это время, отдаленное или близкое, зарю которого мы, во всяком случае, уже приветствуем, встанет во всем своем блеске великий образ той, которую мы сегодня чествуем, принося ей в дар нашу признательность, наши надежды и наши мечты.

Перевод Л. К. Лепинь.

Мария Кюри

Открытие радия [1])

Со времени открытия Анри Беккерелем урановых лучей протекло уже пятнадцать лет. Два года спустя после этого открытия сначала мной одной, а затем совместно с Пьером Кюри было начато исследование этого явления на других веществах. Наши исследования очень скоро привели к открытию новых тел, излучение которых было аналогично урановому, но только гораздо более интенсивно.

Все тела, испускающие такого рода лучи, были названы мною радиоактивными, и проявляющееся в этом излучении новое свойство материи получило соответственно название радиоактивности. Благодаря открытию новых сильно радиоактивных веществ, особенно радия, изучение радиоактивности сделало чрезвычайно быстрые шаги вперед. Открытия следовали друг за другом через короткие промежутки времени; возникала новая наука. Шведская Академия Наук отметила появление этой новой науки

---

[1]) Речь, произнесенная 11/XII 1911 г. в Стокгольме при получении Нобелевской премии по химии.

присуждением нобелевской премии по физике первым работникам в этой области Анри Беккерелю, Пьеру Кюри и Марии Кюри в 1903 году.

Громадное число ученых посвятило себя изучению радиоактивности. Позвольте мне вспомнить здесь одного из них, который точностью своих суждений, смелыми гипотезами и многочисленными работами, проделанными им самостоятельно или совместно с учениками, не только расширил познание новых фактов, но и соединил последние в чрезвычайно стройную систему. Весьма ясной теорией, которая удивительно отвечает фактам, он возвел фундамент для новой науки. Мне доставляет огромную радость воспоминание о том, что г-н Рэтерфорд в 1908 году прибыл в Стокгольм, чтобы в знак заслуженного признания принять нобелевскую премию.

Далекая от какого-либо застоя новая наука непрерывно развивалась, и в настоящее время, отделенная всего лишь пятнадцатью годами от момента открытия Анри Беккереля, она стоит пред миром новых явлений, принадлежащих к такой области, которая имеет близкую связь с физикой и химией и может быть точно определена и описана. В этой области решающее значение в теоретическом отношении имел радий. История открытия и выделения этого вещества является подтверждением высказанной мною гипотезы, что радиоактивность есть свойство материального атома и благодаря этому может служить средством для открытия новых элементов. Эта

гипотеза привела к современным теориям радиоактивности, согласно которым мы насчитываем около 30 новых элементов; эти элементы не могут однако быть ни выделены, ни определены с помощью обычных химических методов.

Далее, мы принимаем, что атомы этих элементов претерпевают превращение, и эта теория нашла себе прямое доказательство в экспериментально установленном факте образования химически вполне определенного элемента г е л и я из химически определенного элемента р а д и я. Если принять это во внимание, то выделение чистого радия надо признать краеугольным камнем научного здания радиоактивности. Но радий представляет собой, кроме того, полезнейшее и сильнейшее вспомогательное средство для экспериментальных исследований по радиологии, и я думаю, что именно это обстоятельство было причиной того, почему Шведская Академия Наук нашла нужным оказать мне великую честь присуждением нобелевской премии по химии за нынешний год.

Поэтому я считаю себя обязанной остановиться на описании радия, как нового химического элемента, оставив в стороне все другие радиоактивные явления, о которых уже было здесь доложено Б е к к е р е л е м. П. К ю р и и Р э т е р ф о р д о м.

Прежде, однако, чем ближе подойти к моей теме, я хочу напомнить, что радий и полоний открыты мною совместно с П ь е р о м К ю р и. Мы обязаны также П ь е р у К ю р и основными работами в области радиоактивности, которые он выполнил частью один, частью вместе со мною, а также со своими учениками.

Химическая часть работы, которая имела целью выделение радия в виде чистой соли и характеристику его, как нового химического элемента, — эта часть была выполнена, главным образом, мною, но она стоит в теснейшей связи с нашей общей работой. И я думаю, поэтому, что я правильно поняла желание Академии, полагая, что то высокое внимание, которое она мне оказывает, относится также и к этой нашей совместной работе и, таким образом, есть в то же время заслуженное чествование памяти Пьера Кюри.

* * *

Я хочу сейчас напомнить о том, что одним из главных свойств радиоактивных веществ является ионизация окружающего воздуха (Беккерель). Если поместить какое-либо соединение урана на металлическую пластинку, над которой находится другая пластинка, и зарядить обе пластинки до некоторой разности потенциалов, то между пластинками возникнет электрический ток. При соблюдении необходимых условий, этот ток может быть точно измерен и может служить мерой активности вещества. Проводимость, сообщенная воздуху, должна быть приписана ионизации, вызываемой лучами уранового соединения.

Применяя этот метод измерения, я начала в 1897 году исследование лучей урановых соединений, и вскоре распространила мои опыты и на другие вещества, с целью установить, не наблюдается ли подобного рода явление

также и на других соединениях. Результат этих исследований был таков, что среди всех известных нам веществ лишь одни только соединения тория оказались в этом отношении аналогичными урановым соединениям.

Особенно поразителен был тот факт, что активность урановых и ториевых соединений проявляется, как свойство атомов элемента урана и элемента тория.

Химические соединения и смеси, содержащие уран или торий, тем активнее, чем богаче они этими элементами. Активность их не уменьшается ни при изменении их физического состояния, ни при химическом превращении.

Я измерила радиоактивность самых разнообразных минералов. Все те, которые оказались радиоактивными, содержали или уран, или торий. Однако, при этом обнаружился совершенно неожиданный факт. Некоторые минералы—урановая смолка, халколит, аутунит—имели гораздо большую активность, чем это отвечает содержанию в них урана или тория. Так, например, некоторые виды урановой смолки, с 75% окиси урана, приблизительно в четыре раза более активны, чем сама эта окись, халколит—фосфорная соль меди и урана, примерно—в два раза активнее урана. Этот факт стоял в полном противоречии с тем предположением, что ни один урановый минерал не может быть активнее металлического урана. Чтобы выяснить это противоречие, я приготовила искусственный халколит из чистых продуктов и получила его в кристаллах, активность которых строго соответствовала содержанию в них

урана. Она была приблизительно в два раза слабее активности металлического урана.

Отсюда я сделала вывод, что избыток радиоактивности в естественных минералах должен зависеть от присутствия небольших количеств сильно радиоактивного вещества, которое отличается от урана и тория, а также и от других ныне существующих известных нам элементов. Если это действительно так, то можно было надеяться выделить это вещество из минералов обычными методами химического анализа. Предполагая, что содержание его, вероятно, равняется нескольким процентам, мы тотчас же— Пьер Кюри и я—начали соответствующую работу.

Но наличное количество этого гипотетического вещества в действительности оказалось значительно меньше, и потребовалась многолетняя работа, прежде чем можно было с уверенностью сказать, что урановая смолка содержит, по крайней мере, одно радиоактивное вещество, которое можно было бы признать за элемент в том смысле, который придает этому названию химия.

Нами был выработан новый метод исследования радиоактивных элементов, основанный на том принципе, что радиоактивность есть свойство материального атома. За каждым химическим отделением следует измерение активности полученного продукта, и на основании его строится заключение о химических свойствах этого активного вещества.

Этот метод нашел себе всеобщее применение; в известном смысле он может быть приравнен к спектральному

анализу. Благодаря большому различию в испускаемых лучах, метод теперь так расширен и усовершенствован, что позволяет производить не только открытие радиоактивных тел, но и точное определение свойств этих последних.

С помощью этого метода удалось быстро обнаружить, что активность действительно может быть сконцентрирована химическим путем. Мы установили, что в урановой смолке содержится, по крайней мере, два новых радиоактивных вещества, из которых один, сопутствующий висмут, был назван полонием, а другой, сопровождающий барий, получил название радия.

Вскоре после этого были открыты и другие радиоактивные вещества: актиний—Дебиерном, радиоторий и мезоторий—Ганом, ионий—Болтвудом и т. д.

Мы были уверены, что открытые нами вещества представляют собой новые химические элементы. Эта уверенность была основана исключительно на атомных свойствах радиоактивности. В химическом же отношении все происходило так, как будто наши вещества были: один—чистым висмутом, а другой—чистым барием. Поэтому необходимо было доказать, есть ли тут следы примесей других элементов, не висмута и не бария, которые именно и характеризуются радиоактивными свойствами. И мы должны были поэтому приступить к выделению этих гипотетических элементов. По отношению к радию это удалось в совершенной степени, но на это потребовалось

больше года напряженной работы. Радий, в виде чистой соли, в настоящее время уже является предметом промышленного производства. Ни с одним из других новых радиоактивных веществ не удалось добиться такого полного успеха.

Лучеиспускающие минералы стали предметом интенсивной разработки, так как заключающийся в них радий делает их чрезвычайно ценными. Эти минералы могут быть обнаружены, как электрометрическим методом, так и самым простым способом по их действию на фотографическую пластинку. Лучшим радиевым минералом является урановая смолка из Иоахимсталя в Австрии, она уже с давних пор перерабатывается на урановые соли. При этой переработке остаются остатки, содержащие радий и полоний. Эти именно остатки и служили нам обычно в качестве исходного материала.

Обыкновенно начинают с осаждения бария, заключающего радий, и висмута, содержащего полоний. Эту работу, которая сначала производилась в лаборатории с количествами до 20 кгр., впоследствии пришлось перенести на завод, так как речь шла о тысячах килограммов. Мы все более и более убеждались на опыте, что радий в этих остатках находится всего лишь в количестве нескольких дцгр. на тонну. Из тонны остатков получают радий, содержащийся в 10 — 20 кгр. сырого сернокислого бария. Активность этого сульфата оказывается уже в 30—60 раз больше активности урана. Эти сульфаты очищаются и

затем переводятся в хлористые соли. В этих солях радий все еще находится в отношении 3 : 100.000. Во французской радиевой промышленности применяются в большинстве случаев еще более бедные радием минералы и вышеприведенное отношение еще более уменьшается.

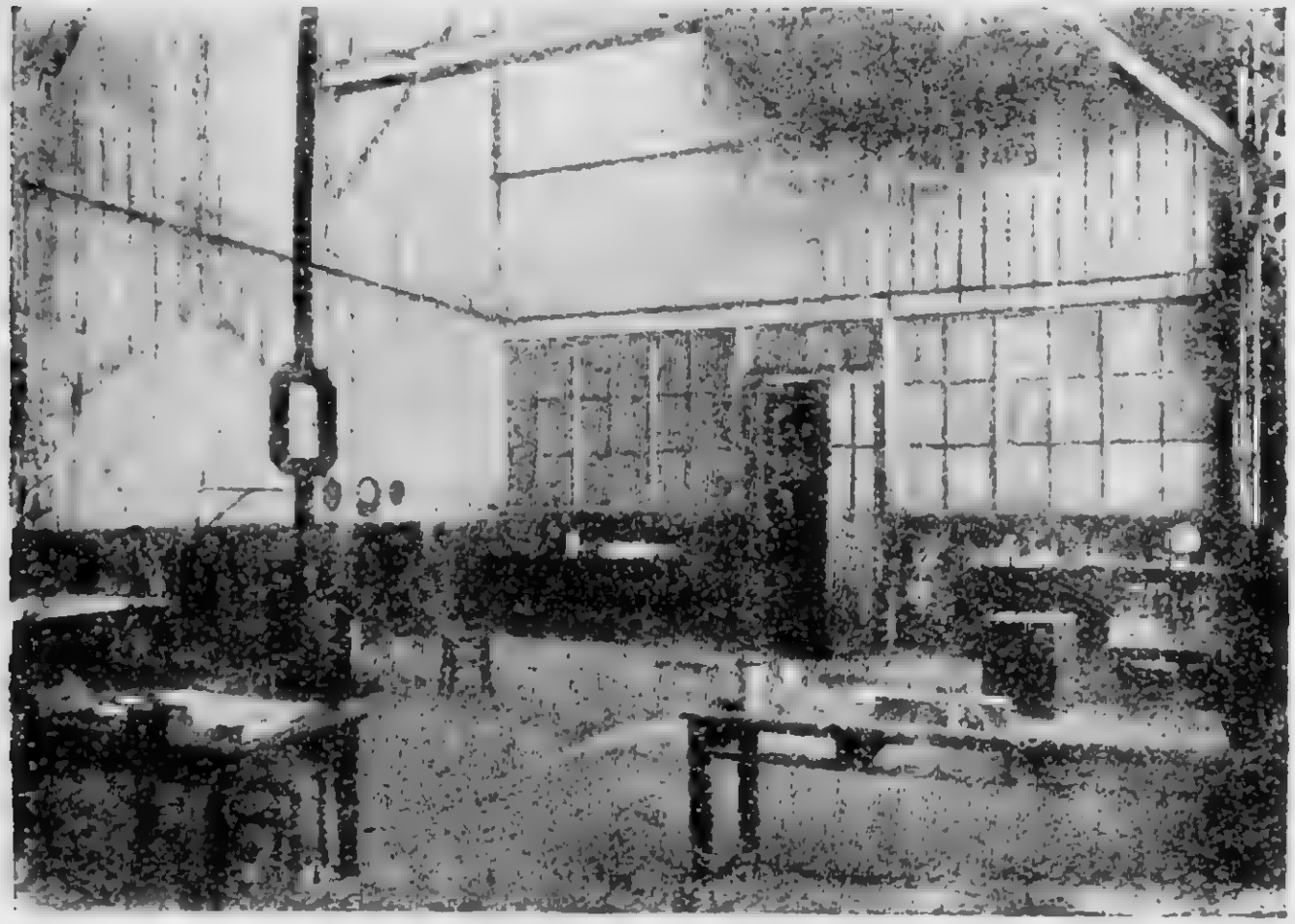


Рис. 1. Лаборатория, в которой был открыт радий. Сарай со стеклянной крышей без каких бы то ни было приспособлений для химических работ.

Отделение радия от бария производилось мною посредством дробной перекристаллизации хлористых солей (можно брать для этого также и бромистые соли). Соль радия скопляется в выделяющихся кристаллах, как более трудно растворимая. После утомительной и методической фракциони-

ровен хлористый барий постепенно отделяется. Для того, чтобы получить возможно более чистую соль, приходилось иногда повторять перекристаллизацию несколько тысяч раз.

Ход отделения контролировался посредством измерения активности.

Первое указание на элемент радий было дано спектральным анализом. В спектре полученного после кристаллизации хлорида обнаружилась новая линия, которую Демарсэ приписал новому элементу. По мере увеличения активности соли, возрастала и интенсивность этой новой линии, показывались другие новые линии, тогда как спектр бария все более и более стушевывался. Когда, наконец, была достигнута очень высокая степень чистоты, спектр бария стал едва заметным.

Я проделала целый ряд повторных определений среднего атомного веса металла, который содержался в исследованной спектроскопически соли. Для этой цели определялся в виде хлористого серебра хлор, содержавшийся в определенном количестве безводной соли, после того, как я убедилась, что метод этот дает вполне хорошие результаты, даже при работе с очень малыми количествами вещества—от 0,1 до 0,5 гр., если пользоваться при этом очень быстро работающими весами и не допускать поглощения влаги во время взвешивания. Атомный вес возрастал по мере того, как спектр указывал на обогащение соли радием. Найденные последовательно числа были: 138; 146; 174; 225; 226,45. Этот последний атом-

ный вес был получен в 1907 году с 0,4 гр. очень чистой радиевой соли. Результаты нескольких определений были: 226.62; 226,31; 226,42; они подтверждены новейшими опытами.

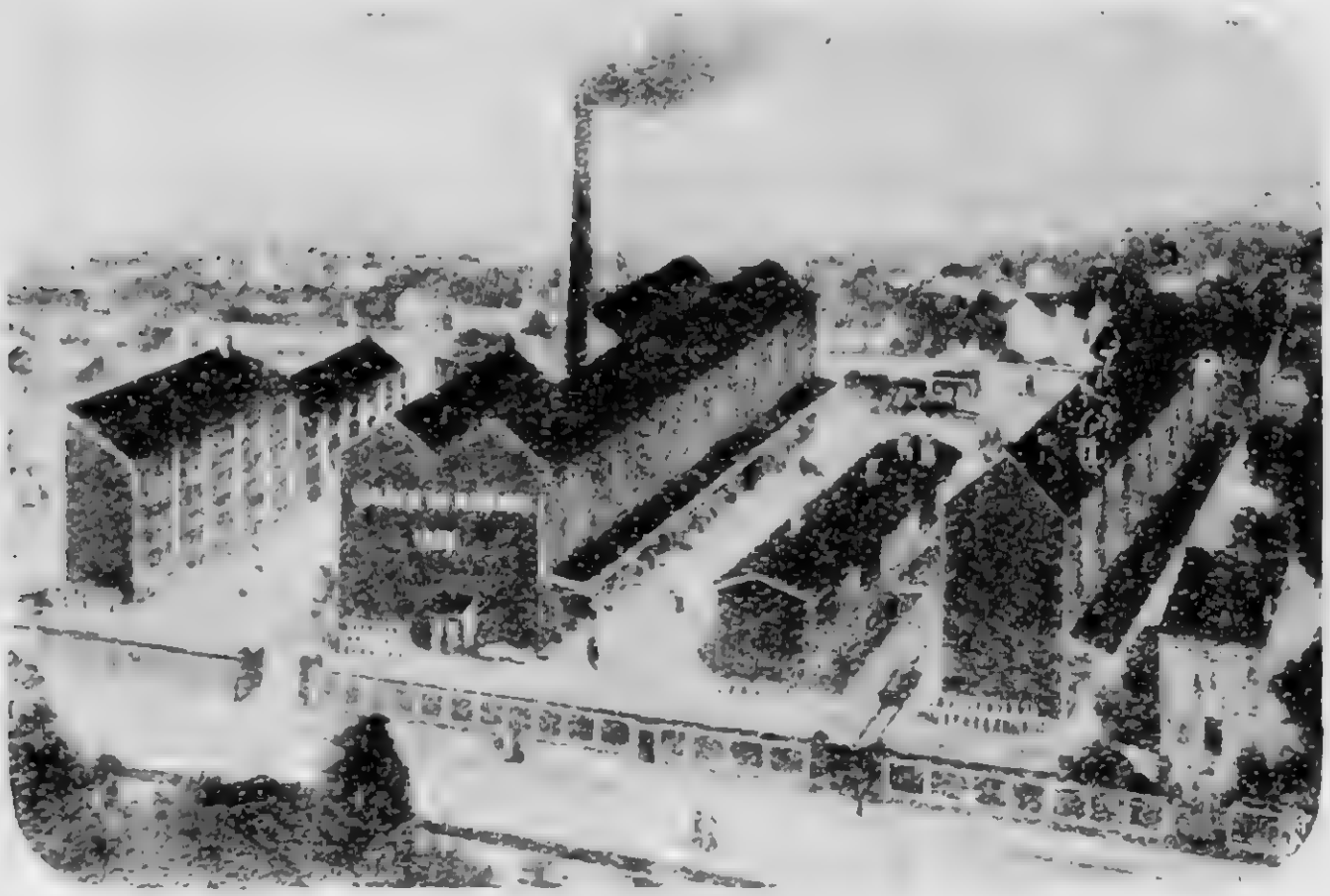


Рис. 2. Французский радиевый завод в Ножане (Nogent) на Марне.

Получение чистой соли радия и определение его атомного веса доказали бесспорно, что радий есть новый элемент, и позволили определить его положение в ряде других элементов. Радий является высшим гомологом бария в семье щелочно-земельных металлов и стоит в периодической системе Менделеева в том же горизонтальном ряду, в котором находятся уран и торий. Спектр радия

точно определен. Эти столь неоспоримые данные нашли себе признание среди химиков и дали прочное основание новой науке о радиоактивных телах.

Химически радий очень мало отличается от бария. Соли обоих этих элементов изоморфны; соли радия в общем менее растворимы, чем соли бария. Удивительно, что такая высокая радиоактивность радия не влечет за собой никакой химической аномалии, и что химические его свойства как раз те самые, которых следует ожидать на основании его положения по атомному весу в периодической системе. Радиоактивность радия в его твердых солях приблизительно в пять миллионов раз больше радиоактивности равного количества урана. Благодаря такой радиоактивности соли радия обнаруживают самопроизвольное свечение. Следует также заметить, что радий непрерывно испускает энергию, которая, если измерять ее в виде выделившегося тепла, равна приблизительно 118 калориям на 1 гр. радия в 1 час[1]).

Радий удалось получить и в металлическом виде— М. Кюри и А. Дебиерном в 1910 году. Метод, примененный для этой цели, заключался в перегонке амальгамы радия, полученной электролизом раствора хлористой соли с ртутным катодом в атмосфере весьма тщательно очищенного водорода. Опыт был произведен всего с одним дцгр. и поэтому доставил громадные экспериментальные затруднения. Полученный металл плавится около

[1]) Более поздние измерения дают число—137 калорий. Н. Ш.

700° и при этой температуре начинает испаряться. Он чрезвычайно быстро изменяется на воздухе и энергично разлагает воду.

Радиоактивные свойства металлического радия оказались именно такими, какие можно было ожидать на основании предположения, что радиоактивность солей остается без изменения при соединении его с другими элементами.

Подтверждение этого факта имело практическое значение, ибо громко раздавались голоса сомнения со стороны тех, которым гипотеза об атомной радиоактивности казалась недостаточно доказанной.

Несмотря на то, что радий получен в весьма ничтожном количестве, однако, в общем, можно сказать, что это вещество является вполне определенным и уже в достаточной мере изученным химическим элементом.

К сожалению, этого нельзя утверждать относительно полония, хотя с этой целью и было предпринято много работ: причина этого кроется в том, что полония находится в минералах в 5.000 раз меньше, чем радия.

Прежде чем притти теоретически к такому заключению, мною было проделано много утомительных опытов для того, чтобы сконцентрировать полоний. Правда, я получила препараты очень большой активности, однако, мне не удалось достичь тех конечных результатов, как при радии. Затруднения увеличивались еще тем, что полоний подвергается быстрому произвольному распаду, при чем он исчезает наполовину в течение около 100 дней.

Мы знаем теперь, что и радий также не вечен, но он исчезает с гораздо меньшей скоростью — наполовину приблизительно в 2.000 лет.

С нашими средствами едва ли можно надеяться на определение атомного веса полония, ибо по теории можно предвидеть, что даже самый богатый им минерал содержит не более нескольких сотых долей миллиграмма полония в целой тонне. Однако, мы можем надеяться, что нам удастся наблюдать спектр этого вещества. Получение полония в более или менее значительных количествах— к этому я еще вернусь—представляет собой задачу, имеющую громадный теоретический интерес.

Не так давно, совместно с Дебиерном, я переработала много тонн урановых остатков, с целью получить полоний. Работа велась сначала на заводе, а потом в лаборатории и дала в конце-концов несколько миллиграммов вещества с радиоактивностью приблизительно в 50 раз более сильной, чем у равного ему по весу количества радия. В спектре этого вещества можно было наблюдать некоторые новые линии, из которых важнейшая отвечает длине волны 4170,5. Согласно атомной теории радиоактивности спектр должен исчезать в течение того же промежутка времени, в какой исчезает активность; этот факт удалось подтвердить экспериментальным путем.

* * *

До сих пор я рассматривала радий и полоний, как химические вещества. Я показала, каким путем то основ-

ное предположение, что радиоактивность есть свойство материального атома, привело к открытию новых химических элементов. Теперь я хочу рассказать более подробно, каким образом эта гипотеза приобрела значение,— благодаря различным соображениям и экспериментальным фактам, приведшим к созданию теории радиоактивных превращений атома.

Начало этой теории нужно искать в рассуждениях об источнике той энергии, которая освобождается при радиоактивных процессах. Эта энергия обнаруживается в испускании лучей, которые вызывают тепло, электричество и свет. Излучение это совершается самопроизвольно и не вызывается какой-либо известной нам причиной. Для об'яснения этой освобождающейся энергии были предприняты многочисленные исследования. Одна из гипотез, которая была высказана Пьером Кюри и мною еще в самом начале наших исследований, рассматривает эти лучи, как излучение материи, сопровождающееся потерей веса радиоактивным веществом; и в то время, как это вещество, находящееся в состоянии еще незаконченного развития, претерпевает атомное превращение, оно выделяет свободную энергию.

Сначала эта гипотеза могла быть высказана только наравне с другими, столь же равноправными. Однако, после того, как был получен целый ряд экспериментальных фактов, ее подтверждающих, она приобрела первенствующее значение и в конце-концов завоевала общее признание. Главнейшие из этих фактов следующие:

Существует целый ряд радиоактивных явлений, при которых радиоактивность оказывается связанной с невесомыми количествами материи. При этом излучение не имеет постоянного характера, но прекращается более или менее быстро. К таким веществам относятся: полоний, радиоактивные эманации, осадки с индуцированной радиоактивностью.

С другой стороны, в некоторых случаях имеет место возрастание радиоактивности со временем. Это наблюдается у свежеприготовленного радия, у эманации, только-что введенной в измерительный аппарат, у тория, полученного из тория X, и т. д.

Более детальное изучение этих явлений показало, что все они могут быть объяснены весьма удовлетворительно, если предположить, что при всяком уменьшении радиоактивности происходит разрушение радиоактивной материи, в то время, как увеличение ее связано, наоборот, с образованием новых радиоактивных веществ. Кроме того, как исчезающие, так и появляющиеся лучи имеют чрезвычайно различный характер, и предполагают, что каждый определенный род лучей может служить характеристикой определенного вещества, которое является их источником: вместе с ними появляется и вместе с ними исчезает.

Если радиоактивность есть свойство атома, то появление или исчезновение определенного рода радиоактивности должно отвечать образованию или разрушению радиоактивного элемента.

И если, наконец, радиоактивная энергия есть результат превращения атома, то всякое радиоактивное вещество должно подвергаться атомному превращению, хотя бы оно и казалось неизменным. В некоторых случаях превращение протекает чрезвычайно медленно, как, например, у радия и урана.

Изложенная мною теория принадлежит Резерфорду и Содди. Они называют ее теорией распада атома. На основании этой теории можно заключить, что первичная радиоактивная материя, как, например, радий, может пройти через ряд превращений, в результате которых из атома радия возникает ряд атомов со все меньшим и меньшим атомным весом, и пока вновь образующийся атом остается радиоактивен, не может установиться никакого стационарного равновесия. Это равновесие будет достигнуто лишь тогда, когда вещество перестанет быть активным.

Самым блестящим успехом этой теории было доказательство той гипотезы, что гелий, который всегда находится в радиоактивных минералах, есть один из конечных продуктов превращения радия, и что атомы его, образующиеся при распаде атома радия, выбрасываются в виде α-лучей. Образование гелия из радия было доказано экспериментально Рамсэем и Содди, и тот факт, что вполне определенный химический элемент радий дает начало другому столь же определенному элементу гелию, в настоящее время больше уже не оспаривается. Работами Резерфорда и его учеников было еще раз подтверждено, что выбрасываемые радием электрически заряженные

α-частицы могут быть обнаружены в виде гелия в том пространстве, куда они попадают.

И еще раз должна здесь отметить, что этот взгляд о связи радия с гелием мог быть высказан только на основании уверенности, что радий есть такой же химический элемент, как и все другие известные нам химические элементы. О том, что он представляет собой соединение гелия с другим каким-либо элементом, не может быть никакой речи. Отсюда ясно, какое важное значение с этой точки зрения имела работа, направленная на изучение химической природы радия. И становится ясен тот путь, по которому гипотеза об атомном характере радиоактивности и теория радиоактивного распада привели к экспериментальному открытию первого абсолютно точно доказанного случая превращения атома. Это—факт, значение которого будет признано всеми. Он, несомненно, является поворотным пунктом во всем химическом мировоззрении.

Многочисленные работы, связанные с теорией радиоактивного превращения, привели к признанию 30 новых радиоактивных элементов, которые по своим исходным элементам об'единяются в четыре серии. Это—серии урана, радия, тория и актиния.

Серии урана и радия могут быть, впрочем, соединены вместе, ибо доказано, что радий есть потомок урана. Последним из известных нам радиоактивных потомков радия является полоний: образование его из радия в настоя-

щее время—уже доказанный факт. По всей вероятности, серия актиния также родственна урану [1]).

Новейшие исследования показали, что калий и рубидий также испускают очень слабые лучи, которые сходны с β-лучами урана и радия. Однако, мы еще не знаем, можем ли считать эти элементы за радиоактивные вещества, т.-е. за такие, которые претерпевают превращение.

Гелий является одним из конечных продуктов распада радия. Его атомы отрываются от атомов радия и от атомов элементов, образующихся при превращении радия. Предполагают, что атом радия дает атом полония после отщепления 4 атомов гелия. После отщепления пятого атома гелия образуется неактивный элемент, атомный вес которого принимается равным 206—на 20 единиц меньше веса радия.

Согласно взглядам Рэтерфорда этот конечный элемент есть не что иное, как свинец. Это предположение требует экспериментальной проверки, и в настоящее время в моей лаборатории ведутся в этом направлении работы. Образование гелия из полония было доказано опытами Дебиерна.

Относительно большое количество полония, которое было получено М. Кюри и А. Дебиерном, позволило сделать одно важное исследование. Оно заключается в счете α-частиц, испускаемых в большом числе полонием, и в собирании и измерении соответствующего им объема гелия.

---

[1]) В настоящее время это предположение доказано точно. Н. Ш.

Так как каждая α-частица дает один атом гелия, то таким способом можно определить число атомов гелия, занимающих данный об'ем и имеющих данный вес. Отсюда можно вычислить число молекул, содержащихся в одной грамм-молекуле газа. Это число—константа Авогадро—имеет чрезвычайно большое значение. Опыты с полонием дали приблизительное число, хорошо совпадающее с числами, которые были получены по другим методам. Самый счет α-частиц производится по электрометрическому методу, предложенному Рэтерфордом, который усовершенствован применением регистрирующей фотографической установки.

* * *

В заключение мне хочется еще раз на короткое время вернуться к новой химии радиоактивных веществ. Для того, чтобы получить радий из минерала, нужно переработать тонны материала. Те количества радия, которым располагают в лабораториях, колеблются от миллиграммов до—самое бо́льшее—одного грамма. Очень часто приходится работать с материалом, в которых радий неуловим не только весами, но даже и спектроскопом, и, однако, мы имеем методы измерения, столь совершенные и чувствительные, что можем точно сказать, с каким ничтожным количеством радия мы имеем дело. Радиоактивный анализ по электрометрическому методу позволяет определить тысячные доли миллиграмма радия с ошибкой не более 1% и открыть 10^{-10} грамм радия в нескольких граммах вещества. При том разведенном состоянии, в ко-

тором радий встречается в минералах. этот метод был единственным, который мог привести к его открытию. Еще поразительней кажется чувствительность этого метода при работе с эманацией радия, которую можно открыть в количестве, не превышающем 10^{-10} куб. миллиметра. Так как относительная радиоактивность какого-либо вещества при одном и том же излучении стоит приблизительно в обратном отношении к средней продолжительности его жизни, то радиоактивная реакция может достичь при очень короткой средней продолжительности жизни необычайной степени чувствительности. Мы теперь привыкли в лаборатории обращаться с веществами, существование которых может быть обнаружено только по их радиоактивным свойствам, но которые. тем не менее, мы можем прекрасно определять, растворять, снова выделять из раствора и осаждать электролитически. Эта химия совершенно особенная. и которую. действительно, с полным правом можно назвать химией невесомого.

Перевод Л. К. Лепинь.

Мария Кюри

Эталон радия [1])

Количественное определение радия имеет значение для многих работ по радиоактивности. Прежде всего надо упомянуть об определении различных постоянных, которые связаны с определенным количеством радия, как например, определение количества тепла, выделяемого в единицу времени радием и продуктами его распада, находящимся с ним в равновесии. Определение количества положительного электричества, выбрасываемого в виде α-частиц, и отрицательного—в виде β-частиц. Определение ионизации под действием α-, β- и γ- излучений. Определение числа частиц, выбрасываемых радием или одним из продуктов его распада, находящимся в равновесии, и заряда каждой частицы. Определение энергии в форме тепла, получающегося из кинетической энергии α-частиц. Определение отношения между количеством радия и урана, содержащихся в минералах, и содержания радия

---

[1]) Извлечение из статьи в журнале: „Journal de physique". Октябрь, 1912 г.

в поверхности земли, горных породах и родниковой и морской воде. Определение содержания эманации радия в воздухе и числа ионов, образуемых радиоактивными веществами, находящимися в воздухе, воде, почве, и сравнение этого числа с данными непосредственного опыта.

Работы физиологического характера, рассматривающие действия радия и его продуктов распада на здоровые и пораженные ткани, также связаны с определенным количеством радия.

Кроме того, должны быть указаны различные работы, касающиеся продуктов распада радия, которые не представляется возможным выделить в чистом виде; количественные определения их производятся на основании ионизирующего действия их излучений, путем сравнения с ионизирующей способностью определенного количества радия. Так, количество мезотория может быть определено благодаря испусканию им γ-лучей, сравниваемых с испусканием γ-лучей радием.

* * *

Чтобы иметь базу для количественных определений, многие лаборатории пользовались эталонами радия в виде ампулок, содержащих небольшое количество взвешенной соли, химические свойства которой предполагались вполне определенными. Путем растворения содержимого ампулки в определенном количестве воды получали титрованный раствор-эталон. В большинстве случаев пользовались хлористыми или бромистыми соединениями радия.

О чистоте радиевой соли можно судить только по определению атомного веса металла, содержащегося в соли, или по фотографированию его спектра. Первая операция может быть произведена с несколькими дециграммами соли, вторая требует лишь один миллиграмм; кроме того, обе манипуляции сопровождаются потерею вещества.

Наиболее устойчивой из солей радия является его хлористое соединение, но все же для точных определений необходимо до взвешивания подвергнуть ее нескольким кристаллизациям. Бромистая соль радия менее устойчива, ибо ее состав быстрее подвергается изменению под влиянием собственного излучения.

Отсюда следует, что изготовление эталонов радия может производиться только в лабораториях, имеющих достаточный запас радия для производства необходимых работ. Между тем, потребность точных измерений, полученных из опыта, возрастала, и стало необходимым найти возможность сравнивать между собою данные, полученные в различных лабораториях.

Этот вопрос был предложен на рассмотрение съезду радиологов, имевшему место в Брюсселе в сентябре 1910 года.

Съезд избрал комиссию, состоящую из ученых различных стран, работающих в области радиоактивности (Марии Кюри и А. Дебиерна из Франции, Рэтерфорда и Содди из Англии, Гана и Гейтеля из Германии, Мейера и Е. фон-Швейдлера из Австрии, Больтвуда и Эве из Соединенных Штатов).

Комиссия признала необходимым изготовление интернационального эталона радия, состоящего из ампулки, содержащей около 20 млгр. металлического радия.

Согласно пожеланию комиссии изготовление эталона взяла на себя г-жа Кюри, кроме того, комиссия постановила изготовить вторичные эталоны для разных стран, содержание радия в которых должно определяться путем сравнения с интернациональным эталоном при помощи γ-лучей. Титрованные растворы должны изготовляться из солей, в которых содержание радия будет проверено путем сравнения с каким-либо вторичным эталоном.

Постановления комиссии были приняты с'ездом, который, кроме того, постановил:

За единицу принять грамм металлического радия, так как радиоактивные свойства радия одинаковы во всех его соединениях. В виду того, что грамм радия оказался слишком крупной единицей, решили установить более мелкую единицу, в десять раз меньшую, и дать ей особое название.

Так как эманация определяется количеством радия, с которым она находится в равновесии, то нашли нужным установить на этом основании единицу эманации. За единицу приняли количество эманации, находящейся в радиоактивном равновесии с 1 гр. радия. С'езд решил дать этой единице название кюри, в честь Пьера Кюри и его работ в области радиоактивности. Тысячная часть кюри — милликюри служит практической единицей; порядок ее величины является вполне подходящим для работ в ла-

бораториях. Единица более мелкая, например, 10^{-10} кюри, могла бы употребляться при исследованиях радиоактивности почвы и вод.

Количество эманации могло бы быть определено ее весом, но это было бы неудобно для практики. Кроме того, определение количества эманации, находящейся в равновесии с определенным количеством радия, представляет очень сложную манипуляцию, которая еще до сих пор не могла быть произведена с достаточной точностью [1]).

Брюссельский с'езд поручил комиссии сделать все необходимое для того, чтобы установить и ввести в употребление интернациональный эталон.

* * *

Интернациональный эталон был изготовлен в течение августа месяца 1911 года. Взятая для этой цели соль была приготовлена мною в 1907 году в количестве 0,4 гр. хлористого радия для определения атомного веса радия. Доказательством чрезвычайной чистоты этой соли служит вид ее спектра; полученный атомный вес равен 226,5. Соль тщательно сохранялась; часть ее была употреблена для изготовления эталона.

Следующие манипуляции были произведены над солью, при получении ее в окончательном виде: соль была

---

[1]) Позднее эта задача была решена Рамсэем в сотрудничестве с Грэем.

растворена в воде, подкисленной хлористо-водородной кислотой, при этом растворение произошло почти целиком; небольшой осадок образуется всегда со временем, вероятно, вследствие действия соли на поверхность сосуда даже в отсутствии влажности.

Путем фильтрования раствор был освобожден от осадка. По прибавлении небольшого количества уксусно-свинцовой соли, раствор был обработан сернистым водородом. Сернистый свинец, осаждаясь, должен был увлечь с собой все количество радиоактивного свинца (радий D), радия E и полония (радий F), образовавшихся в соли радия в течение 4-х лет. От выпавших в осадок сернистых соединений раствор был отфильтрован и выпарен досуха. Полученная соль была снова растворена в воде, подкисленной хлористо-водородной кислотой, и раствор был концентрирован для кристаллизации. По охлаждении маточный раствор был слит с кристаллов, кристаллы вновь были промыты и опять растворены для новой кристаллизации в сильно кислой среде, процесс прошел весьма удачно и дал несколько крупных удлиненных игольчатых кристаллов. Полученные кристаллы были высушены сначала на водяной бане, потом в сушильном шкафу при 160°; таким образом была получена безводная соль состава $RaCl_2$.

Ампулка была изготовлена в форме узкой стеклянной трубки из обыкновенного стекла с тонкими стенками (0,27 млгр.) с внутренним диаметром в 0,9 млгр. Несколько удлиненное дно трубки имело впаянную платиновую про-

волоку, проникающую внутрь трубки. Эта проволока должна препятствовать накоплению электрических зарядов внутри ампулки, служа проводником электричества между ампулкой и внешним пространством.

Другой конец ампулки имел маленькую стеклянную пробку. Ампулка с пробкой была точно взвешена и наполнена солью при температуре 80°, во избежание поглощения водяных паров из воздуха. и вновь взвешена несколько раз, при чем между взвешиваниями открытая ампулка находилась при 150°, и вес ее не менялся. Приготовленная таким образом ампулка была запаяна на паяльном столе немного выше уровня соли, занимавшей в последней длину в 32 млм. Было проверено. не осталось ли в отделенной части трубки весомое количество соли. при чем оказалось, что ничего не прилипло к отделенной части благодаря тому, что вещество было вполне высушено. Взвешивания производились на весах Кюри с точностью до одной сотой миллиграмма.

Ампулка, тождественная главной ампулке, служила тарой.

В результате всех манипуляций ампулка содержала 0,02199 гр. безводного хлористого радия, с точностью до одной пятидесятой млгр. Вес ампулки равен 0,1022 гр. Количество металлического радия. содержащегося в ампулке, равно 0.01675 гр.

Соль занимает почти всю длину ампулки; такое расположение необходимо для точных измерений, на которые

могут оказывать влияние изменения в положении соли, вызванные сотрясениями.

Несмотря на небольшое свободное пространство внутри ампулки, не следует бояться ее взрыва от накопляющихся в ней газов, так как соль была тщательно высушена, благодаря чему не может произойти образование гремучего газа. Впоследствии придется принять во внимание только образование гелия, которое неизбежно, но для количества радия, содержащегося в ампулке в об'еме 6 мм³ и общем об'еме ампулки 25 куб. мм., давление гелия достигнет одной атмосферы через восемь лет. В действительности ампулка была запаяна при высокой температуре, и после охлаждения давление воздуха в ней должно быть ниже атмосферного, так что можно предположить, что лишь через 15 лет, может быть, придется открыть узкий конец ампулки, чтобы выпустить избыток гелия.

В то время, как во Франции изготовлялся интернациональный эталон, в Вене, в Институте Радия, было сделано несколько вторичных эталонов, содержащих различные количества безводного хлористого радия, взятого из запасов Венской Академии Наук.

Тогда нашли возможным притти к определенным соглашениям относительно эталонов и созвать с этой целью комиссию, которой Брюссельский с'езд поручил эту работу.

* * *

В конце марта 1912 года в Париже была собрана интернациональная комиссия в составе семи членов.

Занятия комиссии состояли в сравнении различных эталонов и в установлении правил их употребления.

Путем сравнения – γ-излучений вторичных эталонов с интернациональным были измерены количества чистого радия, заключающиеся в эталонах.

Установка измерительных приборов была произведена Радиоактивной Лабораторией в Сорбонне под наблюдением Дебиерна, в помещении, занимаемом лабораторией Липпманна, где воздух обладал нормальной проводимостью. Сравнение было произведено двумя различными способами, которые дали вполне совпадающие результаты: отступления между различными эталонами были порядка погрешности измерений, равные приблизительно 0,2%.

Совпадение результатов, полученных при сравнении эталонов, изготовленных в различных местах из чистых солей, добытых различными способами, независимыми друг от друга, хотя из одной и той же руды, имеет большое значение. Оно подтверждает вполне определенный состав безводного хлористого радия и служит доказательством совершенства методов сравнения, основанных на измерении γ-лучей. Таким образом, устанавливаются методы количественного измерения радия, заслуживающие полного доверия.

Сравнение эталонов облегчается тем, что все ампулки сделаны из стекла одинаковым образом.

По окончании работ комиссия приняла следующие постановления:

1. Эталон, изготовленный К ю р и, признается интернациональным и будет храниться в Париже в Международном Бюро мер и весов, имея назначение лишь для измерения вторичных эталонов, предназначенных для различных стран.

2. Один из эталонов, изготовленных в Вене, будет храниться в Венском институте под названием вспомогательного эталона (31,17 млгр.).

3. Вторичные эталоны должны быть изготовлены из соли, в количестве от 10 до 40 млгр., содержащей не менее 90% радия, в ампулках одинаковой формы с вспомогательным эталоном. Они будут измеряться в Вене и Париже и снабжаться удостоверениями, указывающими количество содержащегося в них радия.

4. Так как радий, из которого был изготовлен интернациональный эталон, принадлежал г-же К ю р и, то комиссия постановила ходатайствовать перед заинтересованными странами о возвращении г-же К ю р и равного количества радия.

Теперь остается рассмотреть состояние интернационального эталона в настоящее время и законы, по которым совершается эволюция препарата радия, и их значение для употребления эталона.

В момент запаивания ампулки, ее содержимое с химической точки зрения представляло из себя чистый безводный хлористый радий, состава $RaCl_2$. С точки зрения радиоактивности в соли, с момента ее кристаллизации происходит накопление эманации и последователь-

ных продуктов распада радия, при чем через месяц достигается почти стационарное состояние. Количества эманации и радия *A*, *B*, *C*, находящихся в равновесии с солью, весьма малы (меньше одной десятитысячной миллиграмма), тем не менее эти вещества составляют значительную часть излучения; лучи γ должны быть приписаны радию *C*. В течение последующей медленной эволюции накопляются радий *D*, *E* и *F*, количество которых растет в течение времени, измеряющегося за период приблизительно в сто лет. Из этих веществ только радий *E* служит источником γ-лучей значительно меньшей проницаемости, чем лучи радия *C*, и, повидимому, они не могут играть заметной роли при измерениях, если пользуются γ-лучами, прошедшими через пластинку свинца толщиною в 1 см.

Пренебрегая излучениями продуктов медленной эволюции радия, мы должны все же считаться с эволюцией самого радия и с убыванием со временем γ-излучений, следующих показательному закону с периодом, приблизительно, в 2000 лет. Отсюда, убывание за год будет приблизительно равно 0,04%, так что в течение первых десяти лет эталон можно считать неизменным; в дальнейшем придется вводить некоторую незначительную поправку, определив ее приблизительно; этого будет вполне достаточно, чтобы эталон действительно оказал те услуги, которые от него ожидают.

С другой стороны, возникает опасение в том, что не может ли радий, полученный из урановой руды, содержать в невесомом количестве следы радиоактивных веществ, не

представляющих собою продуктов распада радия и способных испускать γ-лучи.

Среди этих веществ следует опасаться одного из продуктов распада тория, содержащегося обычно в урановых рудах, именно мезотория,—одного из спутников радия. В процессе радиоактивного распада мезоторий дает целый ряд продуктов, при чем последний член этого ряда служит источником возникновения γ-лучей, сравнимых по своей проникающей способности с γ-лучами радия *C*: присутствие его может изменить закон эволюции γ-излучения и внести неточности в измерения радия. К счастью, некоторые урановые руды, из которых добывается радий, содержат торий в весьма незначительном количестве; ему соответствует столь малое количество мезотория, что оно не может вызвать осложнения, указанные выше. Такова иоахимстальская смоляная обманка, содержащая приблизительно 1 клгр. тория на 50.000 клгр. руды с 53% окиси урана, из которой может быть добыто 3,7 гр. радия.

Так как γ-лучи одного килограмма тория имеют интенсивность совершенно незначительную по сравнению с γ-лучами 3,7 гр. радия (порядка 3 стотысячных), то присутствие мезотория не может внести существенной ошибки в эталоны, изготовленные из иоахимстальской руды.

Таким образом, интернациональный эталон дает возможность измерений при вполне определенных условиях, не подчиненных никаким случайностям.

Эти условия возможно сделать еще надежнее, изготовив при аналогичных условиях эталон, за активностью которого можно следить при помощи прибора для абсолютных измерений (например, пользуясь методом пьезоэлектрического кварца), и получить, таким образом, возможность найти опытным путем изменение излучения эталона со временем.

* * *

Установление эталона радия должно оказать следующие услуги науке и технике:

1. С чисто научной точки зрения—дать возможность согласовать числовые данные, полученные в различных лабораториях, при вполне определенных количествах радия. В случае разногласия в полученных результатах, произвести проверку произведенных работ, что может привести к открытию новых явлений.

2. С точки зрения применения для лечебных целей—обеспечить надежное пользование физиологическими свойствами излучений, дав возможность вполне точно измерять интенсивность взятого источника лучей.

3. С точки зрения техники—придать этой отрасли ее гораздо больше устойчивости и определенности, дав возможность приготовлять препараты, содержащие вполне определенные количества радия или мезотория, так, чтобы потребители относились к ним с полным доверием.

Мария Кюри

Радиоактивность и сходные с ней явления

I. Открытие радиоэлементоз

Радиоэлементами пазываются некоторые элементы, которые постоянно испускают лучи, способные действовать на фотографичсскую пластинку или вызывать разряд электроскопа.

Анри Беккерель был первым, который в 1896 году открыл это свойство на соединениях урана; позже мне удалось наблюдать то же самое на соединениях тория. Пзмеряя эту радиоактивность количественно (способом, описанным ниже), мне удалось показать, что это явление есть существенное свойство атомов тория и урана. Однако, некоторые руды урана и тория проявляют радиоактивность гораздо более сильную. чем можно было бы ожидать по количеству содержащихся в них урана или тория. Я предположила, что эта аномалия обусловливается присутствием очень малых количеств еще неизвестных сильно радиоактивных элементов.

Отделение радиоэлементов

Чтобы определить эти элементы, я применила новый метод анализа. При этом методе приемы (осаждение, кристаллизация и проч.) сами по себе не отличались от обычных химических процессов, но каждая из получаемых отдельных порций изучалась с точки зрения ее радиоактивности. Таким образом можно было следить за тем, в каких фракциях концентрируются радиоактивные элементы. Именно этим методом Пьер Кюри и я открыли полоний и радий; тем же методом позднее были открыты и другие радиоактивные элементы (в частности актиний Дебьерном, мезоторий и радиоторий — Ганом, полоний — Больтвудом и пр.).

Вследствие их особых свойств радиоэлементы приобрели большое значение в науке и современной технике.

Степень радиоактивности

Изучаемое вещество помещается в ионизационную камеру, например, в конденсатор с пластинками. Активное вещество в порошке помещается на пластинке B (рис. 1). Благодаря его радиоактивности «ионизируется» или делается проводником электричества воздух, находящийся между двумя пластинками конденсатора.

Чтобы измерить эту проводимость, доводят пластинку B до высокого потенциала, соединяя ее с одним из полюсов батареи V, другой полюс которой отведен в землю. При условии, что пластинка A сохраняет потенциал земли, между двумя пластинками возникает ток, независимый от

потенциала пластинки B, если этот потенциал достаточно высок (ток насыщения). Если изолировать пластинку A, соединив ее с электрометром, то эта пластинка заряжается, и заряд дает отклонение в электрометре. Отклонение пропорционально силе тока. Однако предпочтительно пользоваться более точным методом, который состоит в том, чтобы компенсировать ток ионизации вспомогательным током,

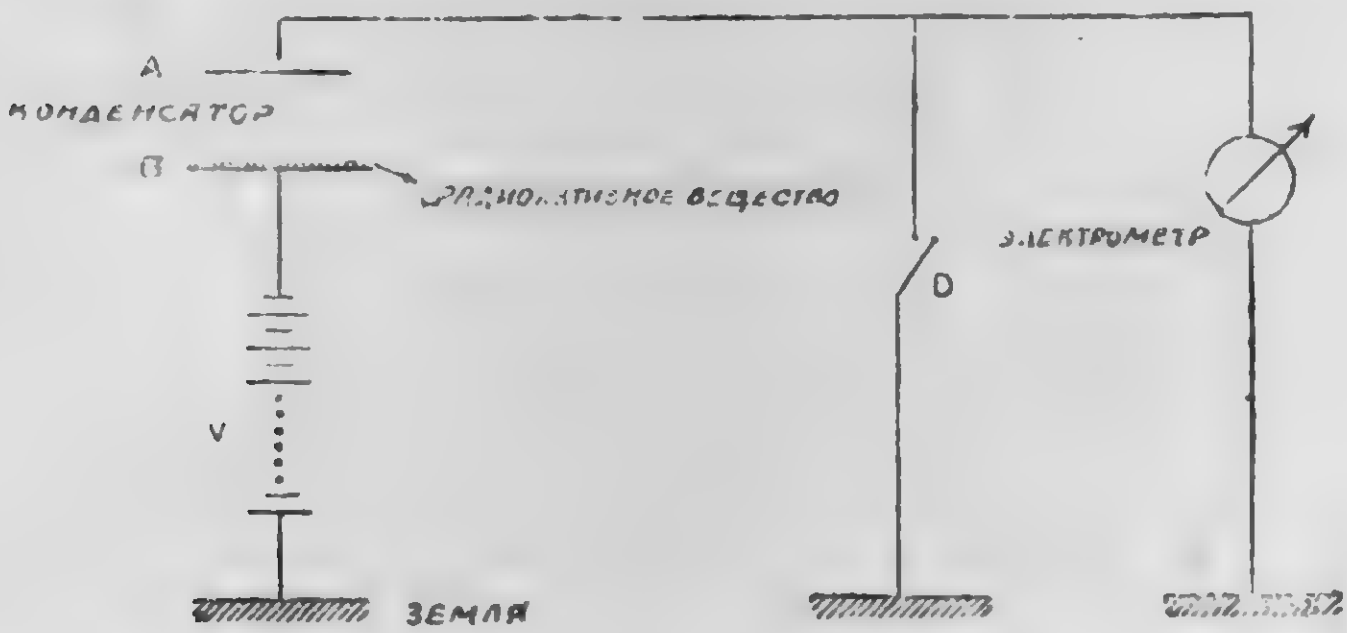


Рис. 1. Исследование радиоактивного вещества по степени ионизации.

благодаря чему можно произвести измерение в абсолютных величинах. Можно воспользоваться, например, в качестве компенсирующего прибора пьезоэлектрическим кварцем.

Природа радиоактивных излучений

Излучения радиоактивных тел состоят из трех родов лучей, обозначаемых буквами α, β и γ и аналогичных тем, которые испускаются трубкой Крукса.

Излучения в этих трубках состоят из:

1) частиц, заряженных положительно (анодные лучи);

2) частиц, заряженных отрицательно (катодные лучи);

3) электромагнитных лучей (*X* лучи).

Подобно этому радиоактивные тела испускают:

Лучи α: частицы, заряженные положительно, масса которых равна массе атома гелия.

Лучи β: частицы, заряженные отрицательно, как в катодных лучах; они представляют собой электроны, масса которых меньше, чем $^1/_{1000}$ массы атома водорода.

Лучи γ: излучение той же природы, что свет и *X*-лучи, но с значительно меньшей длиной волны.

Эти различные лучи отличаются друг от друга их способностью проникать через вещества.

Лучи α обладают этой способностью в малой степени: длина их пути в воздухе при атмосферном давлении не превышает нескольких сантиметров. Достаточно листа бумаги, чтобы их остановить.

Лучи β являются более сильно проникающими: они могут проходить через алюминиевую пластинку в несколько миллиметров толщиною. Они потому проникают более сильно, что скорость их значительно больше.

Лучи γ обладают способностью проникания в очень большой степени; они пронизывают свинец на глубину многих сантиметров.

Аналогичная разница в проникании наблюдается и для лучей, испускаемых в трубке Крукса, одни только *X*-лучи проникают сквозь стенку трубки.

Лучи, как мы сказали, обладают способностью ионизации, т.-е. делают газы проводниками электричества.

Лучи α образуют на своей траэктории ионы с малыми промежутками, β лучи дают ионы более редкие. Лучи γ действуют только вторичными лучами β, которые они вызывают.

Опыт Уильсона (конденсация пересыщенного пара под влиянием наэлектризованных частиц) позволяет судить об этой разнице ионизирующего действия трех разновидностей лучей.

Когда лучи пронизывают пересыщенный пар, каждый из образовавшихся ионов окружается капелькой воды. Достаточно сфотографировать это явление, чтобы дать себе отчет о линейной плотности расположения образующихся ионов.

У лучей α оказывается очень ясная траэктория, почти прямолинейная, очень определенной длины.

У лучей β траэктория криволинейна, образованная раздвинутыми друг от друга точками.

У лучей γ на фотографии получается сеть спутанных линий. образованных раздвинутыми точками.

Все лучи действуют на фотографическую пластинку.

Если поместить в темноте радиоактивную руду на фотографической пластинке, то после нескольких дней экспозиции можно констатировать, что в местах, расположенных под куском руды, пластинка подверглась ее действию. Такой же эффект получается, но только гораздо скорее, с солями радия.

Лучи возбуждают флуоресценцию и фосфоресценцию; в частности они вызывают фосфоресценцию сернистого цинка и цианисто-платинового бария.

На этом свойстве основывается процесс счета α- частиц, испускаемых в определенное время радиоактивным веществом; для этого пользуются явлением сцинтилляций, открытым Круксом. Если рассматривать под лупой экран с сернистым цинком, освещенный α-лучами, то наблюдается появление блестящих точек, которые тотчас же исчезают.

Каждая из этих блесток соответствует действию одной α-частички. Можно считать сцинтилляции, если они не слишком многочисленны.

Другой метод счета был разработан Резерфордом и Гейгером. Очень узкий пучек α- лучей проходит между электродами цилиндрического конденсатора. Центральный электрод соединяется с регистрирующим электрометром. Когда α-частица проникает в конденсатор, она оставляет на своем пути как бы след из ионов, а эти последние в свою очередь, при том интенсивном электрическом поле, которое имеется между электродами, образуют другие ионы (явление ионизации толчком). Измеримый заряд передается, таким образом, электрометру, который испытывает при этом короткий толчок; затем он снова приводится к нулю соответственным приспособлением. Таким образом можно зарегистрировать известное число толчков, полученных в определенное время.

α-лучи. Известно, что α- и β-частицы, будучи заряжены, могут быть отклонены от своего пути как

электрическим, так и магнитным полем. Применяя метод, подобный тому, которым пользуются для катодных лучей, можно определить для этих лучей величину отношения $\frac{e}{m}$ заряда к массе.

Для α-лучей находят:

$$\frac{e}{m} = 4{,}82 \times 10^{3}$$ электромагнитных единиц *C.G.S.*

Если предположить, что заряд e равен двойному элементарному заряду, т.-е. $3{,}2 \times 10^{-20}$ электромагнитных единиц *C. G. S.* (двойной заряд атома водорода при электролизе), тогда получают $m = 6{,}6 \times 10^{-24}$ гр.

Это и есть масса атома гелия.

В конце-концов прямые опыты доказали, что α-лучи образуют гелий.

Существуют несколько типов α-лучей. Они различаются друг от друга скоростью своих частиц и по своему пробегу в воздухе, который обыкновенно не превышает нескольких сантиметров.

Скорость α-частиц определяется из опытов отклонения их магнитным и электрическим полем. Она бывает различна в зависимости от природы радиоактивного вещества, производящего лучи. Для лучей, испускаемых радием *C*, эта скорость равна почти 2×10^{9} см. в секунду.

Сейчас мы сказали, что заряд, который несут α-частицы, является двойным элементарным зарядом. Чтобы его измерить, принимают α-лучи в цилиндр Фарадея (опыт должен, конечно, происходить в пустоте, чтобы избежать вторичной ионизации). С другой стороны, можно

определить на опыте число α-частиц. Из заряда, полученного цилиндром, и из числа частиц, которые туда вошли, определяется заряд каждой частицы, который оказывается равным элементарному заряду e.

$e = 4{,}77 \times 10^{-10}$ электростатических единиц $C.G.S.$

Напомним, что, зная элементарный заряд, можно определить постоянную Авогадро (число атомов в объеме грамм-атома). Назвав это число буквой N, имеем $Ne = 1$ фаралей $= 96.500$ кулонов.

Из определения элементарного заряда, произведенного посредством α-лучей, получают $N = 6{,}06 \times 10^{23}$.

β-лучи. Можно приложить тот же метод для определения $\frac{e}{m}$ и для β-лучей.

Радиоактивные вещества испускают вообще много различных β-лучей с различными скоростями частиц.

Опыт показывает, что для этих различных разновидностей лучей масса обратно пропорциональна величине:

$\sqrt{1-\beta^2}$, где $\beta = \frac{v}{V}$ $\quad v$ ..... скорость лучей

V ..... скорость света.

Таким образом приходят к следующим выводам:

1. Масса β-частиц по происхождению своему является чисто электромагнитной.

2. Эта масса изменяется со скоростью частицы согласно теории Лоренца-Эйнштейна.

3. Отношение заряда к массе для частиц с наибольшей скоростью является таким, какое отвечает электрону.

$$\frac{e}{m} = 1{,}77 \times 10^{7} \text{ единиц } E.\ M.$$

γ-лучи. Эти лучи не могут быть отклонены ни в магнитном, ни в электрическом поле. Их рассматривают, как волнообразные колебания очень короткой длины волны. Для некоторых из них со слабой или средней проникающей способностью можно измерить длину волны (10^{-8} до 10^{-9} см.), как и для X-лучей на основании дифракции в кристаллах: но сильно проникающие γ-лучи обладают длиной волны слишком короткой, чтобы быть измеренной этим методом. Основываясь на скорости β-лучей и на вероятных количественных соотношениях между β-лучами и γ-лучами, можно принять, что длина волны наиболее проникающих γ-лучей имеет длину в 10^{-10} см. или 10^{-11} см.

γ-лучи являются драгоценным средством для измерения количества радия, заключенного в запаянных трубках.

Трубочка помещается сверху ионизационной камеры, окруженной свинцовой обложкой; эта последняя не допускает проникать в камеру никаким другими лучам, кроме γ-лучей.

Определяют по скорости разряда электроскопа или посредством электрометрического метода ток насыщения, вызванный ионизацией, происходящей в камере:

1. Под влиянием γ-лучей изучаемой трубки.
2. Под влиянием γ-лучей трубки эталона с радием.
3. В отсутствии всякого радиоактивного вещества.

Из этих трех измерений определяют количество радия, заключающегося в трубке.

Свойства лучей

Действия химические. Лучи радия разлагают мало-по-малу воду на ее элементы. Стекло и драгоценные камни медленно окрашиваются под влиянием α и β и γ лучей. α-лучи могут вызвать взрыв таких непрочных веществ, как, например, иодистый азот.

Тепловой эффект. Радиоактивные вещества выделяют теплоту. Выделение теплоты может быть определено обычными калориметрическими методами. Так, 1 гр. радия в равновесии со своими продуктами быстрого распада, заключенный в пространстве, которое задерживает α. β и γ-лучи, выделяет в час 137 грамм-калорий.

Наибольшая часть этой энергии, превращенной в теплоту, зависит от α-лучей, являясь результатом их кинетической энергии.

Физиологическое действие. Лучи, испускаемые радиоактивными веществами, действуют на живые ткани и вызывают ожоги.

Радием пользуются в терапии для лечения рака, болезней кожи и проч. В различных странах основаны институты радиотерапии.

Эти учреждения, предназначенные для лечения больных X-лучами и лучами радия, потребовали больших материальных затрат. Некоторые из них обладают многими граммами радия.

II. Радиоактивные превращения

Существует около тридцати радиоэлементов. Наиболее известные и наиболее употребляемые это—радий и мезоторий. Отметим также актиний, ионий, полоний, радиоторий и др.

Радий. Атомный вес радия может быть измерен непосредственным опытом и был найден равным 226. Его химические свойства аналогичны свойствам бария. Можно получить его спектр и точно его исследовать.

Радий и его соединения выделяют беспрерывно радиоактивный газ—эманацию радия. Эманация, отделенная от радия. сама распадается. Стенки трубки, которая заключает эманацию радия, покрываются слоем радиоактивной пыли, который можно стереть (активный осадок).

Теория распада атомов позволяет об'яснить эти явления.

Предполагают, что атомы радиоактивных веществ произвольно превращаются в атомы других веществ, которые в свою очередь подвергаются такому же превращению, и это продолжается до тех пор, пока получится стойкое нерадиоактивное вещество. Эти превращения происходят подобно взрыву, при чем атомы распадаясь, выбрасывают атомы гелия в виде α-частицы или электроны в виде β-лучей.

Здесь дело идет об атомных превращениях, независимых от температуры и от всех внешних воздействий, которые могли применять до сих пор.

Таким образом. это превращение можно выразить следующей схемой.

Радий = гелию (α-частице) + эманация радия.

Так как атом эманации радия получается при выделении из атома радия одного атома гелия (атомный вес 4), то атомный вес эманации должен быть 226.0—4=222.0.

Таким же образом:

Эманация радия=He+RaA	*RaA, RaB, RaC являются составными частями активного осадка*
RaA=He+RaB	
RaB=электрон+RaC	

Возникновение γ-лучей сопровождает выделение β-лучей и не характеризует собой какого-нибудь третьего случая превращений.

Радиоактивные превращения происходят согласно определенному закону: если обозначать через N число атомов какого-нибудь радиоактивного вещества. имеющегося в данный момент t, то число атомов, которое распадается в одну секунду, пропорционально N, например, λN, где λ постоянный коэффициент, независимый ни от N. ни от t, ни от какой-либо внешней причины (температуры и проч.) это—так называемая. радиоактивная, константа данного вещества.

Можно видеть, что

$$dN = -\lambda N dt$$
$$N = Ne^{-\lambda t}$$

Распад радиоактивного вещества происходит всегда согласно показательному закону, но радиоактивная постоянная изменяется в столь широких границах, что

некоторые вещества распадаются вполне в течение долей секунды, тогда как другие являются практически стойкими, например, уран и торий.

Время T, необходимое для превращения половины атомов радиоактивного элемента, называют периодом этого элемента.

$$T = \frac{Log \,.\, nat \,.\, 2}{\lambda}$$

Период эманации радия — 3,85 дней; период радия — 1600 лет. Закон радиоактивного превращения имеет форму закона случая, и к излучению α или β частиц радиоэлементов может быть приложена теория вероятности: выделение каждой частицы соответствует превращению одного атома. Находят, что промежутки между отдельными вылетами не равны и что они распределяются соответственно теории вероятности.

Явления радиоактивного равновесия. Если в запаянной трубке заключается безводная соль радия, то непрерывно происходит образование эманации, которая распадается с образованием активного осадка «быстрого превращения»: радий A, B и C. Этот последний распадается с образованием активного осадка «медленного превращения» радий D, E, F. Если измерять γ-лучи, выходящие из трубки, то те, которые испускаются активным осадком быстрого превращения, сначала усиливаются, затем приблизительно в конце месяца становятся постоянными; тогда говорят, что радий находится в равновесии с эманацией и своим активным осадком; он достиг того состояния, когда

число атомов эманации и радия A, B, C остается постоянным, потому что в каждый момент образуется столько же атомов, сколько их распадается.

В виду того, что образование эманации радием происходит совершенно правильно, можно воспользоваться этим процессом для дозировки радия с точностью до минимальных количеств (до 10^{-10} гр.).

Количество эманации, находящееся в равновесии с одним граммом радия, носит название одного «кюри».

Аналогичные состояния равновесия наступают во всех других случаях, когда элементы происходят друг от друга.

Классификация радиоактивных элементов. Изучение радиоактивных тел позволяет распределить их в три семейства. В каждом семействе радиоактивные вещества происходят один от другого последовательным превращением. Было доказано, что радий—продукт распада урана и полоний—продукт распада радия.

Атомные веса последовательных элементов не были определены непосредственно из опыта за исключением радия и его эманации. Их вычисляют, откидывая четыре единицы для каждой выбрасываемой α-частицы.

Таким образом было найдено, что окончательный продукт превращения урана-радия есть свинец, факт этот подтверждается спектроскопическими наблюдениями. То же самое можно было бы сказать и о других семействах радиоактивных тел, если бы полученные разновидности свинца имели одинаковые атомные веса, чего на самом

деле нет. Свинец, происходящий из радия, обладает атомным весом 206, происходящий же из тория—208.

Древние руды, содержащие уран, содержат в радиоактивном равновесии друг с другом также и все тела, которые происходят из урана. Количество каждого из этих тел пропорционально его периоду распада.

Отношение количество радия к количеству урана всегда одно и то же:

$$\frac{\text{радий}}{\text{уран}} = 3{,}3 \times 10^{-7}$$

Урановые минералы содержат все тела серии радия, равно как и тела семейства актиния.

Руды тория содержат все тела серии тория.

Сверх того руды тория и урана содержат конечные продукты превращения: гелий, свинец, относительное содержание которых является средством для определения возраста руды (многие сотни миллионов лет для древних руд).

Сделаны были попытки поместить новые тела в систему Менделеева. Некоторые радиоэлементы нашли себе место непосредственно в этой таблице, как-то: радий, эманация радия, полоний. Чтобы поместить другие, пришлось соединить элементы в группы, играющие в системе Менделеева роль единичных элементов; радиоэлементы каждой группы обладают в высшей степени близкими химическими и электрохимическими свойствами. Некоторые такие группы содержат уже известные активные или неактивные элементы, как-то: свинец, талий, уран; другие занимают в таблице места прежних пробелов.

Остается еще пять таких пробелов (пустых мест) в системе Менделеева, из которых два места могли бы отвечать радиоэлементам.

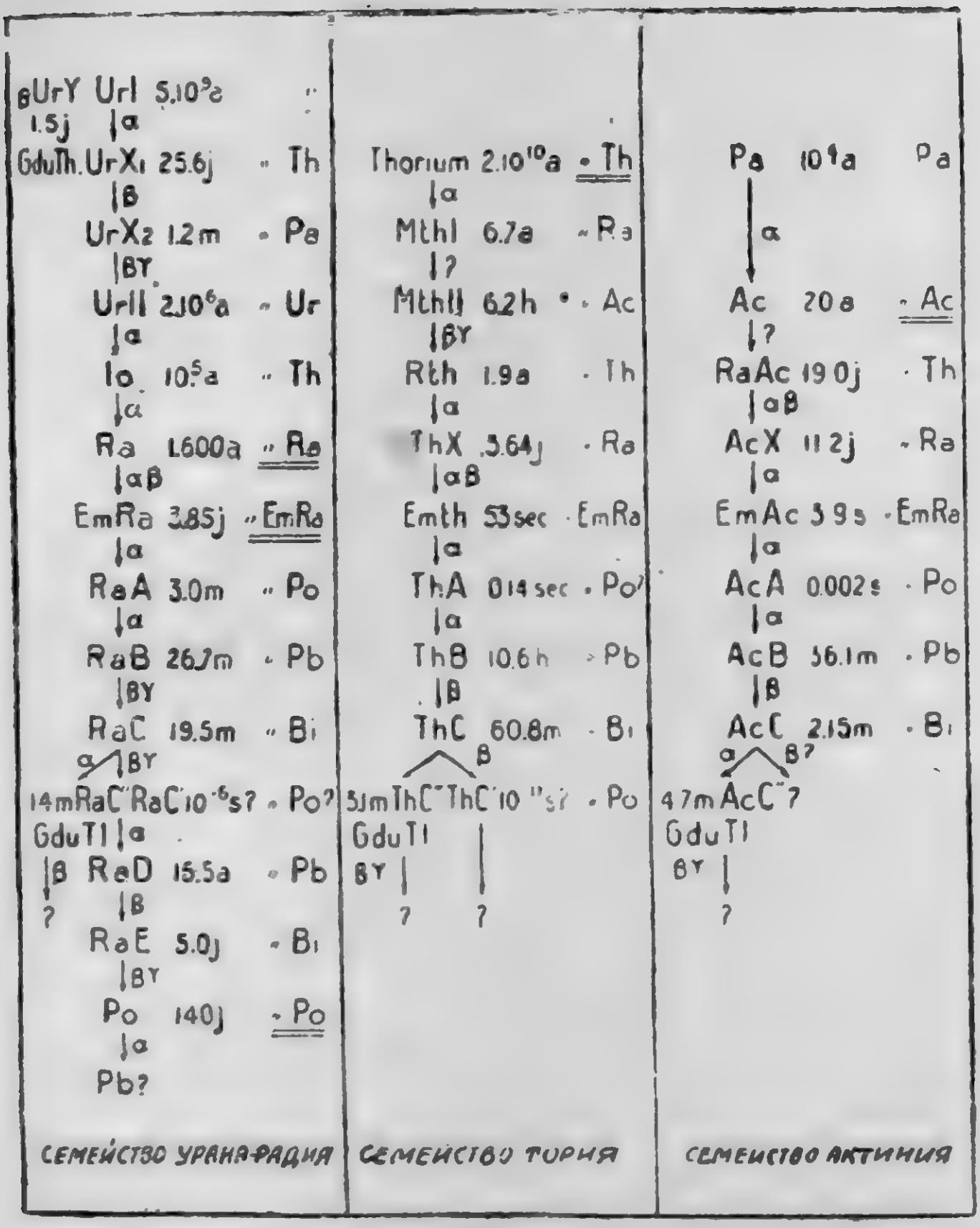
Элементы, занимающие одно и то же место в системе Менделеева, называются изотопными. Они отличаются друг от друга своим атомным весом и своими радиоактивными свойствами, но их химические свойства тождественны, а физические в высшей степени близки.

Это тесное родство соответствует и сходству атомной структуры. Каждый атом составляется из положительного ядра очень малых размеров и из колец электронов, окружающих это ядро. Изотопными элементами являются те элементы, у которых заряд ядра одинаковый; он является, кроме того, кратным от элементарного заряда e—Ne Число N или атомное число представляет собой номер порядка элемента в периодической системе и характеризует его химический тип. Следовательно, не атомный вес, но атомное число определяет собой химические свойства элементов.

Радиоактивные элементы распределяются в пределах значений от 81 (тип таллия) до 92 (тип урана).

Много простых тел (хлор, ртуть и проч.) составлены из смеси изотопных тел, которые прежде не различали друг от друга, так как не могли применять в этих случаях методов, пригодных для радиоэлементов. В настоящее время их сложность состава открыта, благодаря новому методу анализа положительными лучами. В них относитель-

Таблица I.


UrY 1.5j
Urı 5.10⁵a
UrX₁ 25.6j
UrX₂ 1.2m
UrII 2.10⁶a
Io 10⁵a
Ra 1600a
EmRa 3.85j
RaA 3.0m
RaB 26.7m
RaC 19.5m
14m RaC' RaC 10⁻⁶s? Po?
GduTl
RaD 15.5a
RaE 5.0j
Po 140j
Pb?
Th
Pa
Ra
Ac
Rn
Em
Po
Pb
Bi
СЕМЕЙСТВО УРАНА-РАДИЯ
Thorium 2.10¹⁰a
MthI 6.7a
MthII 6.2h
Rth 1.9a
ThX 3.64j
Emth 53sec
ThA 0.14sec
ThB 10.6h
ThC 60.8m
53m ThC' ThC 10⁻¹¹s?
GduTl
СЕМЕЙСТВО ТОРИЯ
Pa 10⁴a
Ac 20a
RaAc 19.0j
AcX 11.2j
EmAc 3.9s
AcA 0.002s
AcB 36.1m
AcC 2.15m
47m AcC' ?
GduTl
СЕМЕЙСТВО АКТИНИЯ

ное содержание изотопов оказывается постоянными в природных образцах различного происхождения.

Однако, можно получить небольшие изменения в составе смеси изотопов путем повторной диффузии или перегонки,—обстоятельство, показывающее, что является возможным их разделение, по крайней мере, частичное.

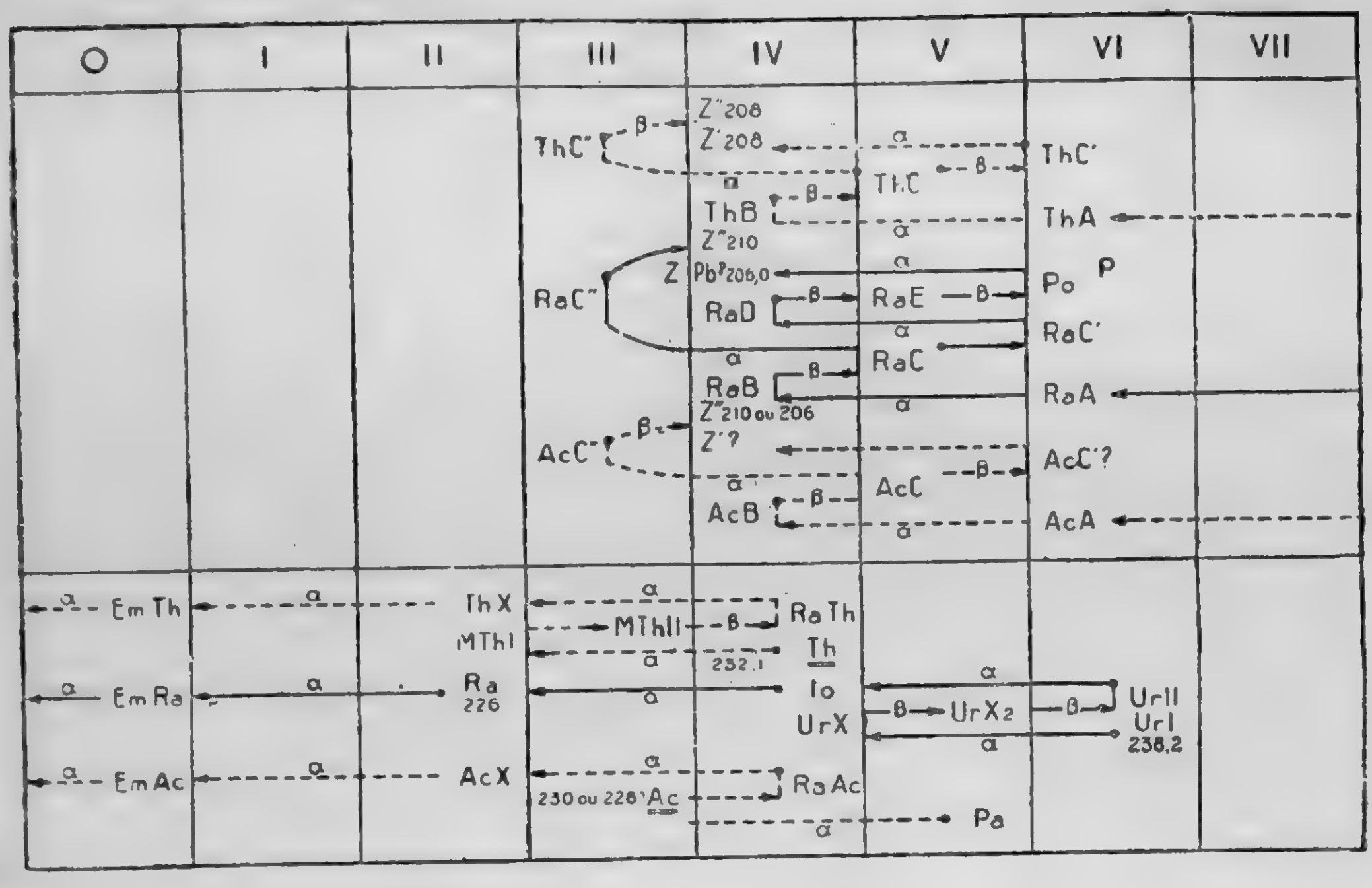
С точки зрения практической задачи приготовления радиоактивных тел, можно сказать, что два тела одной и той же группы изотопов неразделимы, за исключением распада того тела, которое имеет наиболее короткий период. Таким образом, никогда не могли приготовить чистый мезоторий из руды, так как руды, в которых он находится, постоянно содержат его изотоп, радий, период которого является более длинным. Мезоторий, следовательно, постоянно смешан с радием. Чтобы приготовить его свободным от радия, надо взять в качестве исходного материала чистые соли тория.

Радиоэлементы в природе. Различные метеорологические явления, как-то: постоянная ионизация, наблюдаемая в атмосфере, и образование капелек тумана на ионах, все это находится в связи с лучами, испускаемыми радиоактивными веществами, распределенными в почве и в атмосфере.

Все горные породы земной коры содержат радиоактивные элементы в очень малом, но измеримом количестве (приблизительно 10^{-12} гр. радия на грамм породы).

Атмосфера постоянно содержит в малом количестве радиоактивные эманации и их активные осадки. Мине-

Таблица II.


O
I
II
III
IV
V
VI
VII
ThC''
β
Z''208
Z'208
α
ThC'
β
ThC
α
ThB
β
Z''210
α
Z
Pb 206,0
RaC''
RaD
β
RaE
β
Po
P
α
RaC'
α
RaC
RaB
β
α
Z''210 ou 206
AcC''
β
Z'?
AcC'?
α
β
AcC
AcB
β
AcA
α
EmTh
α
α
ThX
α
MThII
β
RaTh
MThI
α
Th
232,1
EmRa
α
α
Ra
226
α
Io
α
UrII
β
UrX2
β
UrI
UrX
α
238,2
EmAc
α
α
AcX
α
230 ou 226 Ac
RaAc
α
Pa

ральные источники часто содержат эманацию радия. присутствием которой об'ясняют их лечебные свойства. Газы. которые выделяются из этих источников, часто содержат эманацию радия, равно как и небольшие количества гелия.

Предполагая, что средняя радиоактивность земли такова же, как и радиоактивность ее поверхностных слоев. можно вычислить, что количество теплоты. выделяемое радиоактивными элементами, превосходит количество теплоты, теряемой землей через лучеиспускание. Соответственно этому возможно, что земля в настоящее время находится в периоде разогревания. Были сделаны аналогично этому попытки об'яснить солнечную теплоту радиоактивностью веществ. составляющих солнце.

III. Серии опытов

Серия А.—1. Разряд электроскопа излучением трубки Крукса.

2. Разряд электроскопа лучами соли радия. Изучение влияния металлических экранов.

3. Разряд электроскопа лучами соли полония. Полоний, не испускающий β и γ-лучей, действует только на расстоянии нескольких сантиметров. Его лучи задерживаются простым листом бумаги.

Серия В.—1. Исследование светового действия радиоактивных тел. Фосфоресценция. Флуоресценция.

Серия С. Опыты для обнаружения заряда лучей. Для этого употребляют электроскоп, представленный на

рис. 2. Радиоактивное вещество вызывает заряд золотого листка, который постепенно отклоняется от своего первоначального положения, касается разрядного шарика в *A*, и затем мгновенно возвращается опять в положение покоя

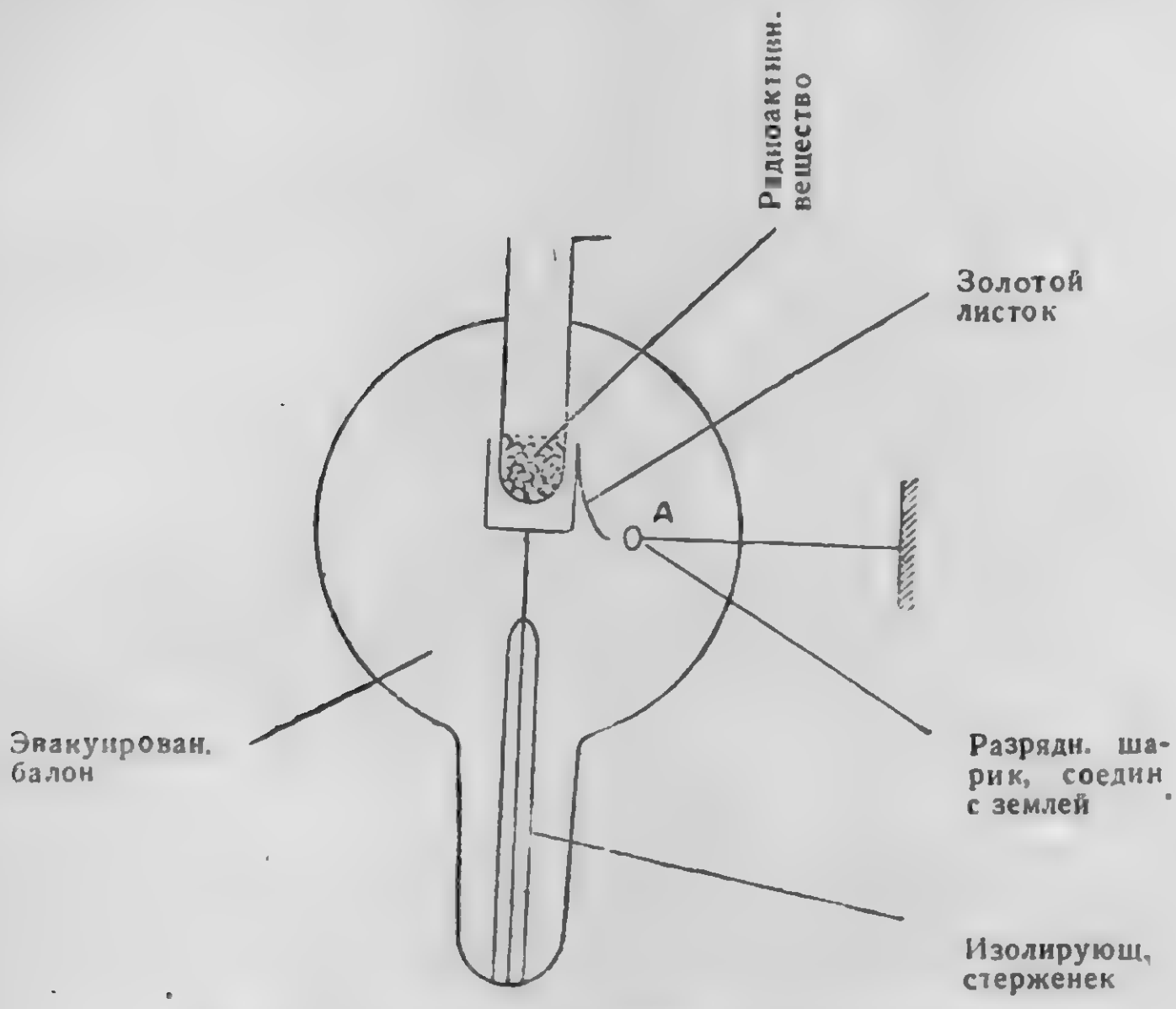


Рис. 2. Опыт обнаружения заряда лучей.

Затем листок заряжается снова, и опыт повторяется бесконечно. Этот опыт был назван поэтому «*perpetuum mobile*»; однако, следует отметить, что продолжительность явления не безгранична, но находится в зависимости от

продолжительности жизни употребляемого радиоактивного вещества.

Действующими лучами являются β-лучи, которые проходят через стеклянные стенки трубки, заключающей радиоактивное вещество.

Мария Кюри

Изотопия и изотопы

I

Изотопия у радиоэлементов

§ 1. Периодическая система элементов

Явление изотопии, существование котораго установлено работами последних пятнадцати лет, находится в тесной связи с периодической системой элементов. Название «изотопы» дано проф. Фред. Содди в 1914 году таким элементам, химические свойства которых оказываются настолько сходными, что их приходится поместить на одно и то же место периодической системы, несмотря на то, что их атомные веса разнятся между собой на несколько единиц.

Напомним вкратце принцип, на котором построена периодическая система. Элементы располагаются в порядке их атомных весов в вертикальные и горизонтальные ряды (см. табл. 1); в каждом из восьми столбцов таблицы, обозначенных от 0 до VII, находятся элементы, облада-

ющие одной и той же валентностью и химически аналогичные: эта аналогия становится очевиднее, если члены одного и того же столбца, начиная с третьего ряда, размещать попеременно направо и налево, при чем обнаруживается различие в каждом столбце двух подгрупп. Некоторые элементы образуют особые группы, таковы, например, редкоземельные элементы, последовательные члены которых обладают весьма сходными химическими свойствами. Дополнительный VIII-ой столбец состоит из триад элементов, из которых каждая играет роль как бы одного элемента, подобно тому, как это наблюдается и в группе редкоземельных элементов. В периодической системе имеются пока еще несколько пустых мест, которые постепенно заполняются по мере открытия новых элементов, в частности она пополнилась радиоэлементами, разместившимися в двух последних рядах.

Эта система имеет глубокий философский смысл, уяснить который нам удалось благодаря успехам современной физики в области наших представлений о внутреннем строении атомов. Опыты проф. Эрнеста Рэтерфорда (E. Rutherford) над рассеянием альфа-лучей показали, что каждый атом должно рассматривать, как состоящий из положительно заряженного ядра, окруженного группой из N электронов, общий заряд которых Ne равен по абсолютной величине заряду ядра (через e здесь означен заряд одного электрона, т.-е. элементарный заряд). Весьма важные исследования Мозелея (Moseley) показали, что для каждого атома число N единиц положительных за-

Таблица I

Периодическая система элементов

	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	2	3	4	5	6	7	8	9			
H	*He*	*Li*	*Gl* [1]	*B*	*C*	*N*	*O*	*F*			
1,008	4,00	6,94	9,1	10,9	12,00	14,01	16,00	19,00			
	10	11	12	13	14	15	16	17			
	Ne	*Na*	*Mg*	*Al*	*Si*	*P*	*S*	*Cl*			
	20,2	23,00	24,32	26,96	28,3	31,04	32,06	35,46			
	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	A	*K*	*Ca*	*Sc*	*Ti*	*V*	*Cr*	*Mn*	*Fe*	*Co*	*Ni*
	39,9	39,10	40,07	45,1	48,1	51,0	52,0	54,93	55,84	58,97	58,68
		29	30	31	32	33	34	35			
		Cu	*Zn*	*Ga*	*Ge*	*As*	*Se*	*Br*			
		63,57	65,37	70,10	72,5	74,96	79,2	79,92			
	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
	Kr	*Rb*	*Sr*	*Yt*	*Zr*	*Nb*	*Mo*	—	*Ru*	*Rh*	*Pd*
	82,92	85,45	87,63	89,33	90,6	93,1	96,0		101,7	102,9	106,7
		47	48	49	50	51	52	53			
		Ag	*Cd*	*In*	*Sn*	*Sb*	*Te*	*I*			
		107,88	112,40	114,8	118,7	120,2	127,5	126,92			
	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
	Xe	*Cs*	*Ba*	*La*	*Ce*	*Pr*	*Nd*	—	*Sm*	*Eu*	*Gd*	*Tb*
	130,2	132,81	137,35	139,0	140,25	140,6	144,3		150,4	152	157,3	159,2
66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
Da	*Ho*	*Er*	*Tu*	*Yb*	*Lu* [2]	*Kl* [3]	*Ta*	*W*		*Os*	*Ir*	*Pt*
62,5	163,5	167,7	168,5	173,5	175,0	?	181,5	184,0	—	190,9	193,1	195,2
		79	80	81	82	83	84	85			
		Au	*Hg*	*Tl*	*Pb*	*Bi*	*Po*	—			
		197,2	200,6	204,0	207,2	209,0	210				
	86	87	88	89	90	91	92				
	Em Be	—	*Ra*	*Ac*	*Th*	*Pa*	*Ur*				
	222		226	226?	232,1	230?	238 2				

[1]) Обычное обозначение этого элемента *Be* (бериллий). *Н. Ш.*
[2]) Он же кассиопий (*Cp*) немецких авторов. *Н. Ш.*
[3]) По новейшим определениям атомный вес 72-го элемента равен 180,8 ± 0,8); этому элементу обычно дается обозначение *Hf* (*Hafnium*), вместо французского названия кельтий; он не принадлежит семье редких земель, но является элементом 4-ой группы. *Н. Ш.*

рядов ядра точно показывает порядковый номер места, занимаемого данным элементом в периодической системе. Метод Мозелея, заключающийся в определении периода колебаний характеристических X-лучей, которые может давать тот или иной элемент, стал истинным методом химического анализа, позволяющим с точностью узнавать химический тип, которому соответствует определенное значение N атомного номера. Весьма сильно помогли развитию теории строения атомов, как системы, состоящей из центрального положительного ядра, и позволили сделать широкие выводы и обобщения работы проф. Нильса Бора (N. Bohr). Модель атома Рэтерфорда-Бора оказалась способной выяснить образование спектров, и Бору удалось в высшей степени интересно осветить вопросы, связанные с распределением и движением электронов вокруг ядра. Теперь мы полагаем, что эти электроны образуют отдельные группы, характеризуемые средним более или менее значительным расстоянием их от самого ядра. Внешняя группа предопределяет химические свойства и валентность; эта последняя измеряется количеством внешних электронов, которое меняется от единицы для щелочных металлов до восьми для инертных газов.

До открытия новых радиоэлементов последний ряд периодической системы содержал только два элемента, уран и торий, обладающие самыми большими атомными весами (238,18 и 232,12). После открытия радия было доказано, что этот новый элемент должен занять в последнем ряду место, соответствующее высшему гомологу

бария, с атомным номером равным 88. Новый метод химического анализа, основанный на исследовании радиоактивности, привел к открытию более тридцати новых радиоэлементов, относительно которых с течением времени было установлено, что они подвержены последовательному и самопроизвольному распаду. Такое количество этих вновь открытых элементов, казалось, может угрожать общим принципам периодической системы, но скоро и весьма удачно мы вышли из возникших затруднений: выход этот был найден в установлении и последующем обосновании понятия об изотопии.

§ 2. Семейство радиоэлементов

Напомним, что радиоэлементы в силу закона их эволюции образуют семейства или серии, отдельные члены которых связаны друг с другом самим процессом их происхождения. Существует три семейства, возглавляемых ураном, торием и актинием; но теперь семейство актиния считают связанным с серией урана. Эти три серии приведены нами в таблице II; для каждого отдельного члена показана величина его п о л о в и н н о г о п е р и о д а, т.-е. время, в течение которого соответствующий член распадается наполовину; процесс распада предопределяется основным законом радиоактивного превращения. Для каждого отдельного члена показан также и тип его превращения, характеризующийся α-, β-, или γ- излучениями. α-лучи представляют собой выбрасываемые из ядра радиоактивного элемента ядра гелия, вследствие чего остаточный

атом теряет четыре единицы атомного веса ($He = 4$) и атомный номер его N уменьшается на две единицы, так как ядро гелия несет две единицы положительного заряда ($N = 2$). β-лучи состоят из выбрасываемых из распадающегося ядра входящих в его состав электронов; атомный вес остаточного атома при этом почти не меняется, так как масса электрона исключительно мала, но атомный номер его N повышается на одну единицу, так как ядро вместе с электроном теряет единицу отрицательного заряда. γ-лучи сопровождают β-излучение и не представляют собой особого третьего типа превращения. В некоторых случаях распад элемента протекает по двум типам, т.-е. превращение вещества сопровождается частью α-, частью β-излучениями, что ведет за собой двоякое превращение данного элемента.

Всматриваясь в таблицу II, мы отмечаем ясно выраженную аналогию в последовательности превращений у всех трех серий. Аналогия эта обнаруживается наличностью трех радиоактивных газов или эманаций. Начиная с этих газообразных членов (их символическое обозначение *EmRa*, *EmTh*, *EmAc*), мы видим, что один и тот же тип превращения для четырех последующих членов повторяется во всех трех сериях. при чем соответствующие члены характеризуются и излучениями одного типа. Этому сходству излучений соответствует, в каждом отдельном случае, и весьма близкая аналогия в химических и электрохимических свойствах.

Таблица II

Семейство урана-радия

Ur I	4,37 × 10^9 лет	Гом.	*Ur*
↓ α			
Ur X_1	23,8 суток	„	*Th*
↓ β			
UrZ 6,7 часов ← *Ur* X_2	1,15 минут	„	*Pa*
↓ β?			
Ur II	10^6 лет	„	*Ur*
↓ α			
UrY 24,6 часов ← *Jo*	6,9 × 10^4 лет?	„	*Th*
↓ α			
Ra	1610 лет	„	*Ra*
↓ αβ			
EmRa	3,85 суток	„	*EmRa*
↓ α			
RaA	3,0 минут	„	*Po*
↓ α			
RaB	26,8 минут	„	*Pb*
↓ β?			
RaC	19,5 минут	„	*Bi*
↓ β?			
RaC'' 1,4 минуты (гомол. *Ti*) ← *RaC'*	10^{-6} секунды?	„	*Po?*

Семейство урана-радия

↓ β ? ↓ α *RaD*	16,5 лет	„ *Pb*
↓ β *RaE*	4,85 суток	„ *Bi*
↓ β? *Po*	140 суток	„ *Po*
↓ α *Pb?*		

Семейство тория

Th	$1{,}61 \times 10^{10}$ лет	Гом. *Th*
↓ α *Mth I*	6,7 лет	„ *Ra*
↓ ? *Mth II*	6,2 часов	„ *Ac*
↓ β? *RaTh*	1,9 лет	„ *Th*
↓ α *ThX*	3,64 суток	„ *Ra*
↓ α,β *Em Th*	54 сек.	„ *Em Ra*
↓ α *Th A*	0,14 сек.	„ *Po*
↓ α *Th B*	10,6 часов	„ *Pb*
↓ β		

Семейство тория

Th C	60 м. 8	„	*Bi*
α ↙ ↘ β			
Th C'' 3,1 мин. (гом. *Ti*) ↓ β_1 ?	*Th C'* ↓ α ?	10^{-11} сек.?	„	*Po*

Семейство актиния.

Pa	$1{,}2 \times 10^4$ лет	Гом.	*Pa*
↓ α			
Ac	20 лет	„	*Ac*
⋮ ?			
RaAc	18,9 суток	„	*Th*
↓ αβ			
AcX	11,2 суток	„	*Ra*
↓ α			
EmAc	3,9 сек.	„	*EmRa*
↓ α			
Ac A	0,002 сек.	„	*Po*
↓ α			
Ac B	36,1 мин.	„	*Pb*
↓ β			
Ac C	2,15 мин.	„	*Bi*
α ↙ ↘ β			
AcC'' 4,7 мин. (гом. *Tl*) ↓ β_1 ?	*Ac C'*	5×10^{-3} сек.	„	*Po*

§ 3. Химия и электрохимия радиоэлементов

Исключая уран и торий, радиоактивные элементы могут быть изучаемы лишь с помощью специальных методов, основывающихся на измерении их радиоактивности. В самом деле, эти вещества доступны экспериментальному исследованию в столь ничтожных количествах, что химические весы оказываются бессильными. Из всех новых радиоактивных элементов один радий может быть взвешен в виде чистой соли, хотя наличность его даже в наиболее богатых им минералах исчисляется приблизительно тремя дециграммами на одну тонну. Содержание в них других радиоэлементов еще меньше, чем радия.

Несмотря на такое крайнее рассеяние радиоэлементов, они проявляют вполне определенные химические и электрохимические свойства, как и обыкновенные элементы. Их можно осаждать и кристаллизовать в присутствии разных других веществ, к которым они обнаруживают более или менее сильное сродство. Можно их осаждать из растворов на электродах и таким образом вычислять их электрохимические потенциалы, и можно также их растворять. Наконец, измерение коэффициентов диффузии и подвижности радиоактивных электролитических ионов дает возможность определить их валентности.

Все эти методы исследования были использованы в целях точного определения характерных свойств отдельных радиоэлементов и привели к непредвиденным результатам. Так, с одной стороны, мы встретились с радио-

элементами, являвшими собой новые химические типы, таковы: радий, актиний, полоний, эманация радия и протактиний, в то время как другие обнаруживают свойства совершенно сходные со свойствами некоторых из неактивных элементов; так радий *D* или радио-свинец очень сходен со свинцом обыкновенным, радий *E* с висмутом, торий C″ и актиний C″ с таллием. Аналогия эта носит особенный характер, она в некотором роде более высокого порядка, чем существующая между гомологами одного и того же столбца периодической системы или между элементами группы редких земель или членами одной из триад восьмого столбца. В самом деле, элементы перечисленных групп могут быть с большей или меньшей трудностью отделены друг от друга с помощью тех или иных химических методов, между тем, как совершенно невозможно отделить ни радий *D* от свинца, ни радий *E* от висмута.

Это явление рассматривается, как особый тип химического родства, непосредственно обнаруженного при опытах над отделением новых радиоэлементов. Часто пытались получить их, исходя из минералов очень сложного химического состава. Процесс выделения в чистом виде данного радиоэлемента иногда становится невозможным вследствие присутствия вещества, которое оказывается химически неотделимым от него; именно это обстоятельство и привело к неудаче всех усилий, направленных к получению в чистом виде некоторых элементов, обладающих достаточно большой средней продолжительностью жизни, каковы ионий и радий *D*.

Вследствие значительного интереса, связанного с выделением новых радиоэлементов, в этой области были предприняты многочисленные исследования. Кроме случая с радием и его эманацией, все эти исследования наталкивались до сих пор на затруднение вследствие либо быстрого распада элементов, либо сходства их с какими-либо другими элементами, что и мешало осуществить желаемое выделение. Такое сходство наблюдается не только у радиоэлементов с неактивными элементами, но и между самими радиоэлементами; так никакие химические реакции не могут разделить радий и мезоторий, хотя средняя продолжительность их жизни, их радиоактивные свойства, их происхождение и способы превращения совершенно различны.

Вполне понятно, насколько парадоксальным должен был казаться такой факт и какой интерес он возбудил. Большой заслугой проф. Содди является то, что он, начиная с 1910 г., впервые привел бесспорные доказательства следующему положению: описанное выше химическое родство совершенно иного порядка и отлично по своей природе от наблюдавшихся до сих пор химических аналогий; иначе говоря, сходство между радием *D* и свинцом или еще лучше, между радием и мезорием не только характеризуется более высокой степенью, чем существующее между редкоземельными элементами, но имеет совсем другую причину. Элементы, обнаруживающие такое особое родство, Ф. Содди назвал в 1914 году изотопами. Кроме того, он высказал предположение, что изотопные

элементы обладают не только одинаковыми химическими свойствами, но и одинаковыми спектрами; смесь тория и иония с 30% иония (оценка содержания иония основывалась на измерении радиоактивности) дает спектр одинаковый со спектром чистого тория, несмотря на то, что атомные веса двух этих элементов различны (231,51 и 232,12).

Понятие изотопии, получившее свое начало в химии радиоэлементов, впоследствии было связано с представлениями об атомном ядре. В настоящее время говорят: изотопные элементы суть элементы, обладающие одинаковым зарядом ядра. Этот общий признак определяет собой один и тот же химический тип и одно и то же место в периодической системе. Смесь из изотопов ведет себя как, единичный элемент, атомный вес которого равен среднему из атомных весов, составляющих данную смесь элементов. Таким образом, вообще говоря, атомные веса, определяемые химией, являются только условным обозначением; этим и об'ясняются неудачи химиков установить между этими числами простые соотношения, о которых высказывались гипотезы еще в самой ранней стадии развития химии. Согласно предположению Ф. Содди явление изотопии не ограничивается только радиоэлементами, оно представляет собой общее явление, и тем самым приобретает широкий философский смысл.

§ 4. Группы изотопных радиоэлементов

Как только понятие изотопии было установлено, мы получили возможность распределить все открытые до сих пор радиоэлементы в периодической системе. В самом деле, для этого достаточно определить одно место для той или иной группы изотопов, каково бы ни было их число в данной группе. Выбор этого места облегчается законом изменения валентности,—открытым независимо Содди и К. Фаянсом (K. Fajans) и заключающимся в следующем:

1. Если атом превращается с выделением одной α-частицы, то валентность остаточного атома понижается на две единицы по сравнению с валентностью первоначально существовавшего атома, а это равносильно перемещению на два столбца (группы) влево в периодической системе.

2. Если атом превращается с выделением β-частицы, то валентность получающегося нового атома становится на одну единицу больше валентности первоначально существовавшего атома, и это равносильно переходу на одну группу вправо в периодической системе.

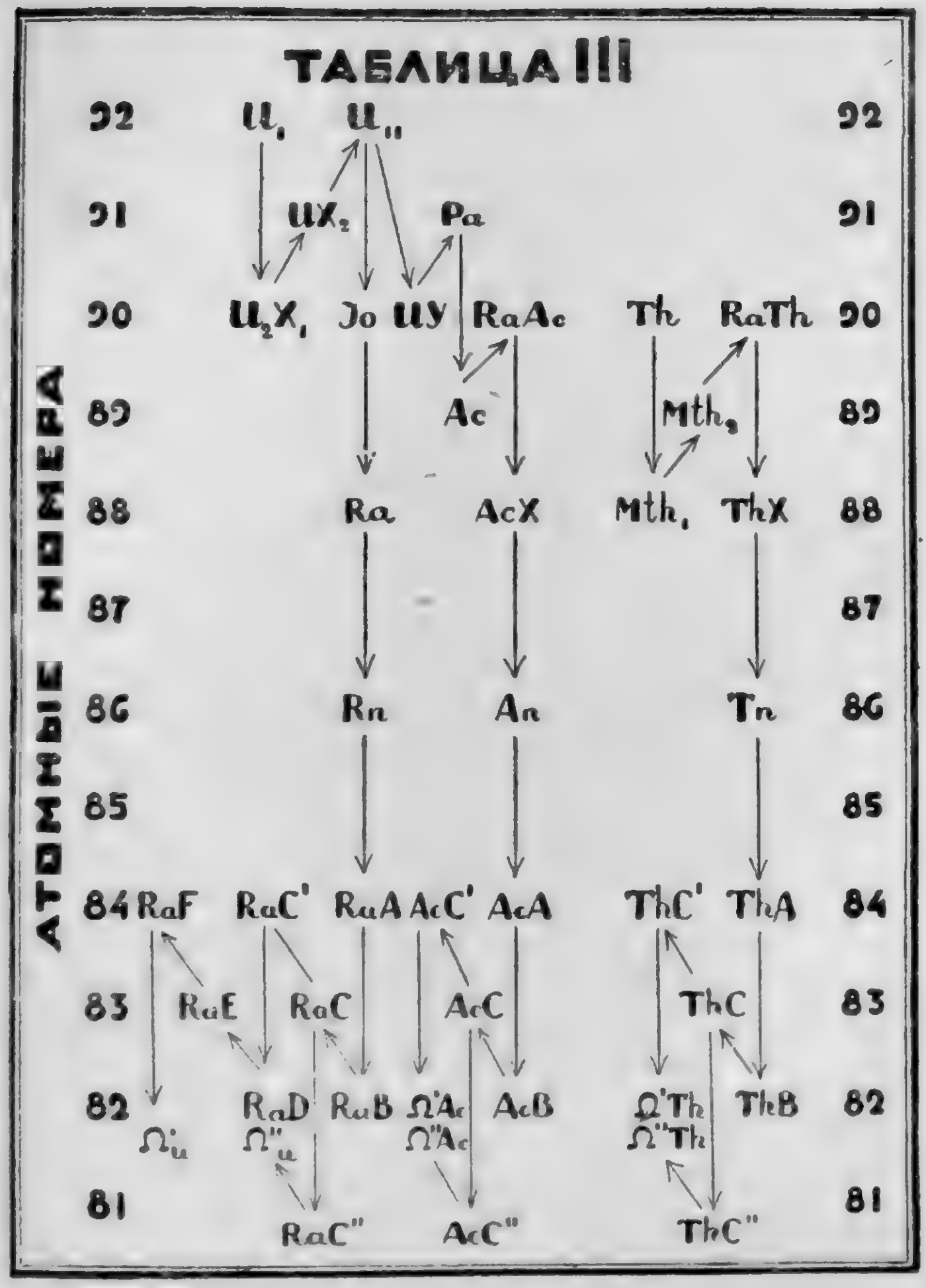
Эти законы, основанные на опытах, в настоящее время могут рассматриваться, как простое выражение того факта, что при выделении α-частицы заряд ядра становится на две единицы меньше; он увеличивается на одну единицу, если выделяется одна β- частица. Валентность уменьшается на две единицы в первом случае и увеличивается на одну во втором, так как она определяется количеством

внешних электронов, и так как атом при изменении заряда его ядра, чтобы остаться нейтральным, должен получить или потерять столько же электронов, сколько он получил или потерял единиц положительного заряда в ядре.

На основании вышеизложенных соображений, все радиоэлементы распределяются на 10 групп, занимающих в периодической системе 10 мест, начиная с N = 81 (таллий) и до N = 92 (уран); места 85 и 87 остаются свободными. Таким образом все члены каждого из трех радиоактивных семейств проходят последовательно через определенные места в периодической системе.

Исключительный интерес приобрела группа изотопов типа свинца вследствие важного значения связанных с этой группой исследований. Здесь речь идет о конечных членах радиоактивных превращений всех трех семейств: в табл. III эти члены обозначены греческими буквами Ω′ и Ω″. К серии урана-радия принадлежит член Ω′U: это урановый свинец или радий G; атомный вес его, предугаданный законом радиоактивных превращений, равен 206. В серии тория два члена Ω′Th и Ω″Th соответствуют одинаковому атомному весу, характеризующему ториевый свинец, и равному 208. Можно ожидать нахождения уранового свинца в урановых минералах, не содержащих тория, и ториевого свинца в ториевых минералах без урана. Изложенная нами теория получила себе исчерпывающее подтверждение путем непосредственного определения атомных весов свинца, извлеченнаго из

ТАБЛИЦА III


АТОМНЫЕ НОМЕРА
92
91
90
89
88
87
86
85
84
83
82
81
U₁
U₁₁
UX₂
Pa
U₂X₁
Jo
UY
RaAc
Th
RaTh
Ac
Mth₂
Ra
AcX
Mth₁
ThX
Rn
An
Tn
RaF
RaC'
RaA
AcC'
AcA
ThC'
ThA
RaE
RaC
AcC
ThC
RaD
RaB
Ω'Ac
AcB
Ω'Th
ThB
Ω'u
Ω''u
Ω''Ac
Ω''Th
RaC''
AcC''
ThC''

разных радиоактивных минералов (Содди. Ричардс. Генигшмидт, Морис Кюри и др.). Было также доказано, что изотопы свинца обладают одним и тем же атомным об'емом, одной и той же температурой плавления, одним и тем же электрохимическим потенциалом, одной и той же проводимостью, одной и той же термоэлектрической способностью. Отличаются они только атомными весами и плотностью; весьма незначительные различия в их спектрах могут быть обнаружены лишь интерференционным методом (Мертон). При соответствующих поправках, по содержанию их в различных радиоактивных минералах можно вычислять геологический возраст соответствующего минерала.

II

Положительные лучи и анализ масс

§ 1. Получение и свойства положительных лучей

Положительные лучи, открытием которых мы обязаны Гольдштейну, возбуждаются одновременно с катодными лучами в трубке с разряженным газом, при пропускании через нее электрического тока высокого напряжения. В то время как катодные лучи являют собой поток электронов, направляющийся от поверхности катода и вызываемый действием поля перед катодом в темном круксовском пространстве, положительные лучи состоят из ионов положительного заряда, они направляются к катоду и получают свое начало в различных точках темного простран-

ства. Чтобы подвергнуть эти лучи исследованию, необходимо заставить их пройти в пространство за катодом, и для этого в катоде устраивают отверстия или каналы. Частицы, несущие положительный заряд, проходят через эти каналы в камеру для наблюдений, помещенную за катодом, поэтому они вначале и получили название **каналовых лучей.**

Исследование этих лучей было предпринято **Вином** (Wien) и Дж. Дж. **Томсоном** (Thomson); оно представляет большие трудности для экспериментатора. В основание методов их исследования положено определение отклонений тонкого пучка этих лучей, на определенной длине его прохождения, вызванное приложением перпендикулярно направлению пучка электрического и магнитного полей. Это отклонение, испытываемое лучами (отклонение магнитное, или электрическое), можно наблюдать с помощью фосфоресцирующего виллемитового экрана, или фотографической пластинки.

Магнитное отклонение Z пропорционально e/mv, где через m обозначена масса заряженной частицы, через e ее заряд и через v скорость. Электрическое отклонение y пропорционально e/mv^2. Вычисляя Z и y, можно узнать отношение заряда к массе, т.-е. e/m, и скорость v.

Способ такого исследования не представляет собой чего-либо нового, до применения к положительным лучам он уже был использован в работах над катодными лучами; именно этим способом и было доказано, что катодные лучи представляют собой движущиеся электроны,

и что отношение их заряда к массе приблизительно в 1800 раз больше аналогичного отношения для водородного иона. Отсюда было сделано заключение, что масса электрона приблизительно в 1800 раз меньше массы водородного атома.

Следует отметить, что масса эта не оказывается постоянной, она есть функция скорости с увеличением которой она тоже увеличивается согласно с формулой Лоренца-Эйнштейна:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{\beta^2}}$$

где через m_0 означена масса, соответствующая малым скоростям, а через β отношение скорости лучей к скорости света.

В то время как атом отрицательного электричества представляет собой определенную единицу заряда, уже не могущую быть разделенной на более мелкие части, положительное электричество переносится, будучи связанным с частицами различной массы, и определение отношения заряда к массе (e/m) в этом последнем случае указывает на то, что эти частицы суть материальные химические атомы или даже молекулы.

Корпускулярные положительные лучи подвержены значительному поглощению, даже в газе при очень низком давлении. Мало того, частицы с положительным зарядом, образующие эти лучи, могут соединяться со встречными электронами, что ведет к нейтрализации их заряда. В силу

этих явлений опыты над магнитным и электрическим отклонением этих частиц дают результаты, которые не очень легко поддаются об'яснению. Для получения наиболее простых условий необходимо в камере для наблюдений, где наблюдается воздействие на лучи магнитного и электрического полей, создать исключительно совершенный вакуум. А, с другой стороны, для образования положительных лучей необходимо известное относительное количество газа, так как именно атомы и молекулы этого газа в трубке и дают им начало. Чтобы выйти из этого затруднения, обычно разделяют камеру, для возбуждения этих лучей от камеры, для наблюдения посредством капиллярной трубки; в этих условиях удается с помощью насоса поддерживать в камере для наблюдений хороший вакуум, в то время как в камере для их образования постоянно обеспечен необходимый запас газа.

§ 2. Метод парабол

Этот метод, открытый Дж. Дж. Томсоном, заключается в образовании одновременно магнитного и электрического поля в взаимноперпендикулярных направлениях, а также перпендикулярно к направлению пучка лучей. Тогда имеет место соотношение $z^2/y = K\ e/m$, где K означает некоторую постоянную.

Если пучек лучей состоит из заряженных частиц одного рода с определенным отношением заряда к массе e/m, но с различными скоростями, то след пучка на экране для наблюдений (фосфоресцирующий экран или фотографиче-

ская пластинка) представляется в виде параболы, ось которой совпадает с направлением y, в то время как направление Z оказывается касательно к ней в ее вершине. Так бывает всегда в случае положительных лучей, получающих свое начало в темном круксовском пространстве перед катодом на различных от него расстояниях и тем самым приобретающих кинетическую энергию пропорционально разности потенциалов между точкой образования луча и катодом. Каждому значению e/m соответствует и определенная парабола. Каждый род заряженных атомов или молекул может быть выражен соответствующей параболой, но, кроме того, один и тот же род молекул или атомов может оказаться с различными зарядами, которые, однако, всегда будут кратными от элементарного заряда; это будут атомы либо молекулы, несущие кратные заряды.

Дж. Дж. Томсон и его ученики получили по этому методу прекрасные отпечатки парабол, соответствующие вполне определенным положительным лучам, претерпевшим изменения при прохождении своем в камеру для наблюдений. Вскоре было установлено, что вышеописанное явление носит весьма разнообразный характер, и удалось наблюдать в состоянии положительных лучей не только атомы или известные в химии молекулы, несущие простой или кратный заряд, но и молекулярные комбинации, неизвестные в других условиях. Основываясь на этих результатах, Дж. Дж. Томсон высказал убеждение, что положительные лучи дают новый метод химического анализа, которому суждено блестящее будущее. Мнение это вполне

оправдалось, и анализ масс, открытый Дж. Дж. Томсоном и затем развитый Астоном, привел к исключительно важным результатам, позволяющим обобщить понятие изотопии, распространив его на большинство элементов.

§ 3. Измерение атомных и молекулярных масс. Параболы неона

Отпечатки, полученные по вышеописанному способу, представляют собой, вообще говоря, определенное число параболических дуг, каждая из которых соответствует определенному отношению заряда к массе. Так как электрическое отклонение y обратно пропорционально кинетической энергии частиц, то его значение не может переходить за известные пределы, соответствующие максимальной энергии, определяемой разностью потенциалов в трубке; все эти параболические дуги вследствие этого ограничиваются некоторой предельной линией, а y остается постоянной величиной.

Отношение e/m приводится в соответствие с массой m, подбирая для заряда e подходящую величину, равную или элементарному заряду или незначительному кратному от него. Выбор допускает некоторую произвольность; но эта произвольность ограничивается теми или иными данными опыта. Например, обнаружено, что кратные заряды редки и скорее появляются на атомах, чем на молекулах. Весьма часто присутствуют в трубке определенные типы заряженных частиц, и их параболы, легко распознаваемые, служат исходными линиями. Такова парабола водородного атома,

несущего простой заряд H^+, и наблюдаемая на всех отпечатках. В большинстве случаев даже следов газа достаточно для получения одной или нескольких характеристических парабол, так что анализ масс посредством положительных лучей требует весьма мало материала.

Водородный атом появляется всегда с единичным зарядом, откуда заключаем, что нейтральный атом водорода обладает только одним электроном; если мы отнимем этот единственный электрон, то останется водородное ядро или протон с единицей положительного заряда. Таким образом вполне законно рассматривать протон, как неделимую единицу положительного заряда, совершенно так же, как это делается относительно электрона, представляющего собой единицу отрицательного заряда. Молекула водорода дает параболу, указывающую на единичный заряд.

Для кислорода наблюдаются три параболы, соответствующие O^+, O^{++} и O_2^+ (атом с единичным зарядом, атом с двойным зарядом и молекула с единичным зарядом). Углерод дает линии C^+, C^{++}, CO^+, CO_2^+ (атом с единичным или двойным зарядом, молекулы окиси и двуокиси углерода с единичными зарядами). Кроме того, этот элемент в соединении с водородом образует сочетания CH^+, CH_2^+. CH_3^+, которые существуют самостоятельно, когда они несут единичный заряд, и не наблюдаются в нейтральном состоянии. Аналогично этому, соединения OH^+, OH_2^+, OH_3^+ существуют в вакуум-трубке в состоянии положительных лучей. Наблюдалось весьма неустойчивое соединение H_3^+; и удалось обнаружить также водородистые соединения бла-

городных газов, как-то: $Ne\,H^+$ или $He\,H^+$. Образование таких сочетаний вполне об'яснимо с точки зрения новейших понятий о строении атомов. Например, атом неона, потерявший один из внешних электронов, имеет, в наружном слое, 7 электронов, вследствие чего он становится похожим на атом фтора или хлора; и понятно, что он может соединяться с водородным атомом потому именно, что он заряжен. Образование других сочетаний, кажущихся химически ненормальными, также получает себе удовлетворительное об'яснение. Наблюдались на отпечатках также параболы, соответствующие отрицательным зарядам; они относятся к тем атомам, которые потеряли свой первичный заряд путем присоединения электрона и, кроме того, захватили один электрон на пути в камеру наблюдений. Этого не случается с молекулами, почти всегда появляющимися с единичным положительным зарядом. Кратные заряды появляются тем чаще, чем выше атомный вес взятого для опытов элемента. Ртуть может терять сразу до 8 электронов.

Самым замечательным результатом анализа масс по методу парабол явилось наблюдение двух линий в случае неона. Эти линии соответствовали массам равным 20 и 22, при чем интенсивность линии 22 была много слабее линии 20. Дж. Дж. Томсон указал, как на возможное об'яснение этого факта, на сложный состав неона из двух компонентов с атомными массами 20 и 22, образующих природную смесь с средним атомным весом, равным 20,2. Это предложение Томсона тотчас же было подвергнуто

экспериментальной поверке Астоном, который применил в этих целях дробную перегонку и диффузию. Первый способ оказался безрезультатным, а второй дал фракции. хотя и с незначительно. но с определенно различными плотностями. И так как изучение радиоэлементов уже указало на существование изотопных элементов, Астон предпринял исследование изотопии по способу положительных лучей, он настолько усовершенствовал этот способ точного измерения масс, что можно было установить сложный характер таких элементов, которые до сих пор считались индивидуальными. Аппарат, которым пользуются для этих опытов. назван Астоном «спектрографом масс».

§ 4. Спектрограф масс

В принцип этого аппарата положена ахроматизация пучка положительных лучей, подобно тому как это осуществляется для света при помощи призм и линз. Как и в этом последнем случае, пучек света, отклоненный и рассеянный первой призмой, бывает ахроматизован второй призмой, частично компенсирующей отклонение, вызванное первой; точно также пучек положительных лучей, сначала отклоненный электрическим полем, вызывающим слабое расхождение лучей с неодинаковыми скоростями, затем отклоняется в обратном направлении магнитным полем так, что два крайние луча рассеянного пучка опять сходятся в одну точку, образующую фокус (см. рис. 1). Каждому значению отношения заряда к массе соответствует свой фокус. Все эти фокусы располагаются вдоль

некоторой линии, которая оказывается почти прямой линией и которая может быть легко воспринята на фотографической пластинке при соответствующей ее установке.

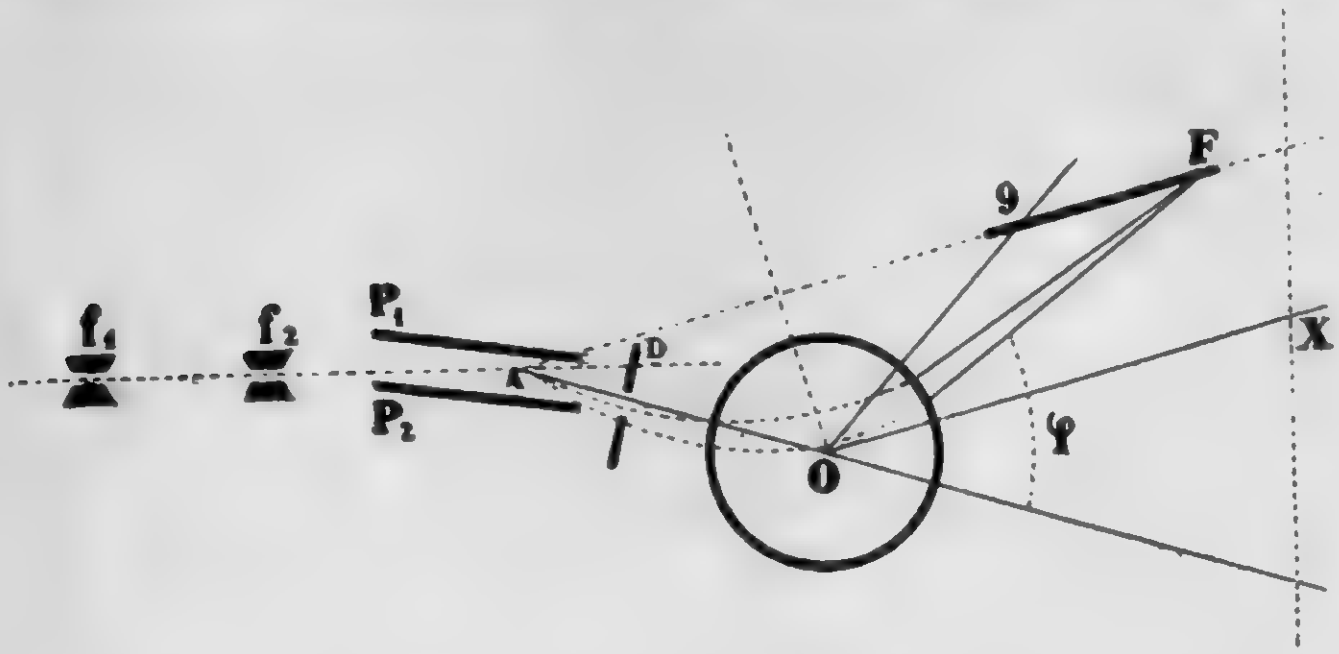


Рис. 1. f^1f^2—щели для получения узкого пучка положительных лучей, P^1P^2—конденсатор, вызывающий электростатическое отклонение, меняющееся в зависимости от скорости частиц с одинаковой массой. A—фокус, из которого кажутся исходящими лучи после электростатического отклонения. D—диафрагма, ограничивающая расходящийся пучек. O—центр полюсов, возбуждающих магнитное поле, отклоняющее лучи в направлении, обратном отклонению электростатическому. F—фокус, в котором сходятся лучи, соответствующие одному и тому же значению e/m. gF фотографическая пластинка, расположенная в фокальной плоскости, т.-е в местах точек для F, соответствующих различным значениям e/m.

Таким образом удалось получить спектры масс газообразных веществ, заключающихся в разрядной трубке. Точность измерений масс в этих опытах превосходит 0,001. С помощью этого аппарата Астон предпринял исследова-

ние различных простых тел в газообразном состоянии и пришел к выводам исключительной важности. Он показал,

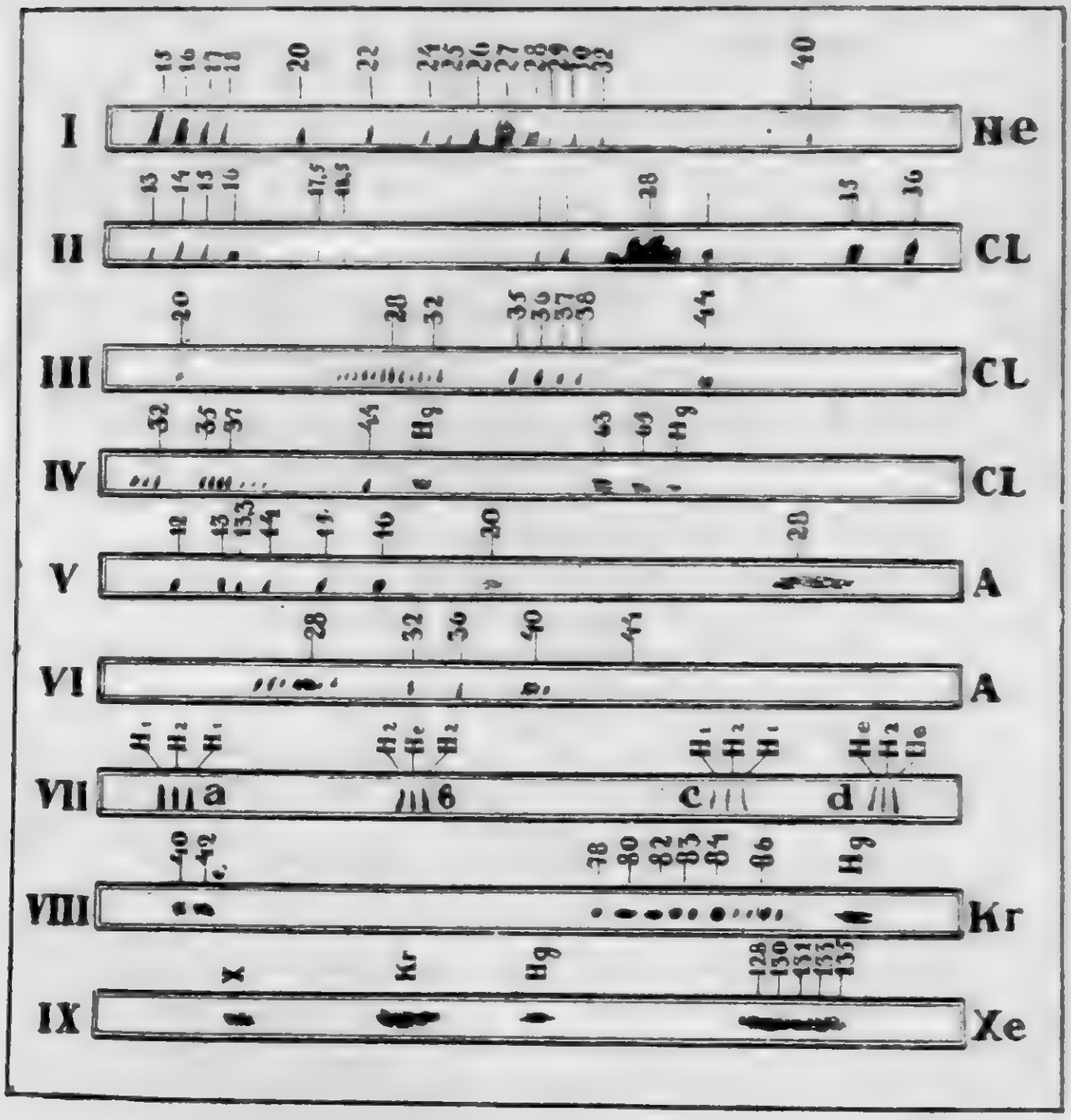


Рис. 2. Спектры масс.

что некоторые из исследованных элементов являются действительно простыми (например, водород, кислород, углерод, сера,), в то время как большинство других имеют

сложный характер, оказываясь смесью из двух или более изотопов. Первые особенно поразительные результаты были получены с неоном, по отношению к которому предположение, высказанное Дж. Дж. Томсоном, совершенно подтвердилось; вскоре после этого было доказано, что и хлор состоит из двух изотопов с атомными массами равными 35 и 37. Ряд последующих опытов показал, что изотопия оказывается явлением, свойственным большинству химических элементов. Прежде чем привести результаты этого прекрасного анализа, мы опишем еще другие приемы, позволяющие производить аналогичные исследования над элементами, не носящими характера сложных газов.

§ 5. Анодные лучи

Известно, что раскаленный катод является источником электронов, могущих образовать катодные лучи. Можно также получить на раскаленном аноде положительные лучи, получающие свое начало с анода, т.-е. анодные лучи. Для этого рассматриваемое вещество, прикрепленное к аноду, должно быть подвергнуто нагреванию, каковое всего удобнее осуществить с помощью нагревающей спирали, по которой проходит электрический ток. Опыты показали, что это нагревание не всегда достаточно для испарения в виде положительных ионов щелочных и щелочноземельных металлов, употребляемых как в металлическом виде, так и в виде окисей или солей. Вот почему некоторые экспериментаторы большинство таких веществ подвергали бомбардировке катодными лучами. Этим, правда, довольно

сложным методом, удалось получить поток положительно заряженных частиц для таких тел, как натрий, калий, магний, цинк и пр.

Эти положительные лучи, исходящие с самого анода и вызываемые однородным полем, возбуждаемым разностью потенциалов (V) между анодом и катодом, все обладают одинаковой скоростью.

Их кинетическая энергия исчисляется по формуле

$$\frac{mv^2}{2} = Ve$$

Чтобы найти для них отношение заряда к массе (e/m), достаточно подвергнуть их отклонению в магнитном поле.

В однородном поле H эти лучи описывают круговую траэкторию радиуса R, так что

$$\frac{mv}{e} = RH$$

Опыты по этому методу были поставлены Демпстером (Dempster). Тонкий пучек анодных лучей, вызываемый известной разностью потенциалов, проникает в однородное магнитное поле, где он описывает полуокружность; по выходе из этого поля, пучек проходит через узкую щель и попадает на изолированный электрод, которому и отдает свой заряд. Чтобы заставить такой пучек следовать по желаемой траэктории, надо подобрать соответствующую разность потенциалов. При изменении этой разности потенциалов меняется и сила тока, получаемая на электроде. Когда V переходит за критическую величину, заряд на электроде проходит через определенно выраженный мак-

симум. Наблюдения над этим максимумом позволяют вычислять отношение заряда к массе (e/m) и, кроме того, дают меру числа частиц в пучке. Если он образован несколькими изотопными атомами различных масс, каждому из них будет соответствовать присущий ей максимум, и по относительному значению этих максимумов оказывается возможным определить пропорциональное содержание изотопов с точностью, превышающей точность работы над фотографическими снимками спектра масс.

§ 6. Результаты наблюдений

В нижеприводимой таблице IV мы даем список всех элементов уже подвергнутых анализу; в этой таблице мы указываем число найденных изотопов, а также их массы. Помещенный нами на стр. 108 рисунок представляет собой несколько фотографических снимков спектров масс.

Общие выводы по этому вопросу сводятся к следующему:

1. Некоторые из химических элементов оказываются индивидуальными; таковы прежде всего водород, затем гелий, углерод, азот, кислород, фтор, натрий, фосфор, сера, и др. Заметим, что среди этих элементов некоторые обладают химическим атомным весом, относительно кислорода, точно кратным четырем (4), и, следовательно, для них атомный номер N равен половине атомного веса P.

2. Большое число элементов, в химически чистом виде, оказывается смесью из изотопов; таковы два изотопа лития, Li_6 и Li_7, или два изотопа хлора, Cl_{35} и

Таблица IV

Изотопы

	Химические типы.		Атомный номер.	Атомный вес.	Число изотопов.	Массы.
1	Водород	*H*	1	1,008	1	1,008
	Гелий	*He*	2	4,00	1	4
	Литий	*Li*	3	6,94	2	6 7
	Бериллий . . .	*Gl*	4	9,1	1	9
	Бор	*B*	5	10,9	2	10 11
2	Углерод	*C*	6	12,00	1	12
	Азот	*Az*	7	14,008	1	14
	Кислород. . . .	*O*	8	16,00	1	16
	Фтор	*F*	9	19,00	1	19
	Неон	*Ne*	10	20,20	2	20 22

	Натрий	*Na*	11	23,00	1	23
	Магний.	*Mg*	12	24,32	3	24 25 26
	Алюминий . . .	*Al*	13	26,96	1	27
	Кремний	*Si*	14	28,3	2	28 29 30
3	Фосфор.	*P*	15	31,04	1	31
	Сера	*S*	16	32,06	1	32
	Хлор	*Cl*	17	35,46	2	35 37 39
	Аргон	*A*	18	39,9	2	36 40
	Калий	*K*	19	39.10	2	39 41
	Кальций	*Ca*	20	40,07	2	40 44
	Железо	*Fe*	26	55,84	1	
	Никкель	*Ni*	28	58,68	2	58 60
	Медь	*Cu*	29	63,57	2	63 65
4	Цинк	*Zn*	30	65,37	4	64 66 68 70
	Мышьяк	*As*	33	74,96	1	75
	Селен	*Se*	34	79,2	6	74 76 77 78 80 82
	Бром	*Br*	35	79,92	2	79 81
	Криптон	*Kr*	36	82,92	6	78 80 82 83 84 86

	Рубидий	*Rb*	37	85,43	2	85, 87
	Олово	*Sn*	50	118,7	8	116 117 118 119 120 121 122 124
5	Сурьма	*Sb*	51	120,2	2	121 123
	Иод	*J*	53	126,92	1	127
	Ксенон	*X*	54	130,2	9	124 126 128 129 130 131 132 134 136
	Цезий	*Cs*	55	132,81	1	133
	Ртуть.	*Hg*	80	200,6	6	197—200 202 204
	Таллий.	*Tl*	81	204,0	4	
6	Свинец	*Pb*	82	207,2	11	
	Висмут	*Bi*	83	209,0	5	
	Полоний	*Po*	84		7	
	Эманации. . . .		86		3	
	Радий	*Ra*	88	226,0	4	
	Актиний	*Ac*	89		2	
7	Торий	*Th*	90	232,15	6	
	Уран X_2	UX_2	91		2	
	Уран	*Ur*	92	238,2	2	

Ост. Элементы с более высокими атомными весами, повидимому, склонны иметь и большее число изотопов (криптон—6 изотопов, ксенон—9 изотопов, олово—восемь, ртуть—6 изотопов).

3. Установлено во всех случаях, что массы, определенные по способу положительных лучей и отнесенные к массе кислорода с большим приближением, выражаются целыми числами. Таким образом, отклонение химических атомных весов от целых чисел должно быть об'яснено наличием смеси изотопов. В большинстве случаев, анализ масс позволяет даже предугадать относительное содержание изотопов, хорошо согласующееся с химическими атомными весами. Но в некоторых случаях (литий, цинк и др.) относительное содержание изотопов, получаемое по способу анодных лучей, кажется весьма изменчивым, и причина этой изменчивости остается невыясненной.

4. Хорошо известные случаи нарушения порядка в системе элементов (аргон—калий, никель—кобальт, иод—теллур) вполне об'яснимы сложным составом и относительным содержанием изотопов.

§ 7. Постоянство химических атомных весов

Так как химические элементы, считавшиеся простыми телами, на самом деле состоят из смеси изотопов, то не естественно ли выразить сомнение в том, что химические атомные веса должны обладать точным значением неза-

исимо от способов их определения и получения из исходного материала.

Что касается методов очистки и химического анализа, то можно думать, что они не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на измеряемый атомный вес. Как мы видим, очень мало надежды на получение химическим путем ощутительного разделения изотопов, и только в исключительных случаях (перегонка ртути в пустоте) могут получиться отклонения, да и то весьма незначительные.

Вопросы, связанные с происхождением элементов, остаются совершенно открытыми. Многие ученые пытались подойти к решению этого вопроса экспериментальным путем, они исследовали атомные веса целого ряда тел различного происхождения (серебро, медь, свинец, ртуть, хлор, натрий и др.). Кроме одного или двух случаев, не удалось отметить сколько-нибудь заметного влияния происхождения на атомный вес, и это наводит на мысль, что все исследованные вещества были уже вполне смешены до отвердевания их в земной коре. Наиболее вероятно, что они образовались в самую отдаленную эпоху, сочетавшись в постоянных отношениях.

§ 8. Статистические соотношения между изотопами Виды изотопии

В настоящее время можно думать, что число изотопов и атомные веса не случайны. Как отмечено, отклонение химических атомных весов от целых чисел гораздо менее значительно, чем это можно было бы полагать,

опираясь на законы теории вероятностей. Теперь мы вынуждены понятие химического элемента заменить понятием химической группы, но часто случается, что группа представлена только одним членом. Есть также основания думать, что число изотопов не может превышать некоторого определенного предела (до сих пор наибольшее наблюденное число их—9), и что отклонение атомных весов изотопов тоже ограничено (до сих пор наибольшее—12 единиц). Заметим также, что случаев нарушения порядка в периодической системе немного,—из этого ясно следует, что число и относительное содержание изотопов подчинены некоторым общим законам, вероятно, статистического характера, обеспечивающим правильное нарастание химических атомных весов по мере повышения атомного номера.

Гаркинсу (Harkins) мы обязаны интересными соображениями по вопросу об относительном содержании в земной коре определенных элементов. Повидимому, особенно изобильно представлены те из них, для которых атомные номер и вес (N и P) четные; преобладают они не только в земной коре, но и в метеоритах (кислород, магний, кремний, кальций, железо и пр.), их общее содержание доходит до 90%.

Некоторые величины атомных весов, повидимому, не связываются ни с какими элементами; таковы 2, 3, 5, 8, 13 и др. Между этими числами не наблюдается никакой связи.

Два элемента могут обладать одной и той же массой и при этом не принадлежать к одному химическому типу; они называются изобарами. Много примеров этому можно указать среди радиоэлементов, по той простой причине, что изобарами оказываются каждые два радиоактивные элемента в тех случаях, когда один из них происходит от другого путем β-превращения (например, *RaE* и полоний). Среди устойчивых элементов примером изобаров являются аргон и кальций (по их изотопам с массой равной 40).

Всматриваясь в превращения радиоэлементов, мы устанавливаем тот факт, что можно прийти к изотопии различными путями и что даже в самой изотопии намечаются своего рода различные степени, хотя основным условием постоянно остается равенство атомного номера. Так, например, более тесное родство наблюдается между *RaB* и *ThB*, играющими в соответствующих им семействах одинаковую роль, чем между одним из этих элементов и радием *D* или свинцом.

§ 9. Спектр изотопов

Первоначальная гипотеза Рэсселя и Содди (Russel и Soddy) приписывала изотопам одинаковые спектры II в самом деле, наблюдения показывали, что трудно установить какое-либо различие в спектрах лучеиспускания, однако Мертону удалось показать весьма легкое отклонение длинных волн некоторых лучей для различных видов свинца. Были опубликованы, правда, еще недостаточно установленные, аналогичные наблюдения над спектрами лития и ртути.

Как будто более значительную разницу обнаруживают наблюдения над полосами поглощения. Эти полосы, как известно, приписывают действию вращения молекул, сопровождаемому колебательным эффектом. Наблюдая их, можно вычислить момент инерции молекул. Опыт показал, что поглощение инфракрасных лучей для хлористоводородного газа не слагается в единичные полосы, но сопровождается дублетами; эти две линии дублетов обязаны своим происхождением двум периодам колебаний у двух изотопов хлора 35 и 37; числовые данные для дублетов подтверждаются и теоретически. Нет никаких сомнений в том, что сходство спектров изотопов не безусловно, но период колебаний, конечно, больше зависит от заряда ядра, чем от его массы. В случаях высоких периодов (X-лучи) до сих пор не наблюдалось сколько-нибудь заметной разницы в спектрах изотопов.

III

Строение атомов

§ 1. Единица вещества—элементы строения

Изучение радиоактивных превращений привело к доказательству, что составными частями атомов являются, с одной стороны, гелий, с другой—электроны, и поскольку при радиоактивных превращениях выделяется гелий или электроны, эти последние должны быть составными частями ядра. С давних пор представляется весьма вероятным, что атомы водорода так или иначе также должны

принимать участие в строении ядра. и таким образом мы возвращаемся к понятию об единице вещества,—к понятию, на заре химии высказанному Праутом (Prout). Исследования Астона подкрепили эту точку зрения, показав, что атомные веса действительно простых элементов выражаются целыми числами.

Значительное отклонение обнаруживается у водорода и кислорода, или—что сводится к тому же—у водорода и гелия. При $O=16$, $He=4$, а $H=1{,}0077$. Эта недостача в массе гелия относительно водорода в настоящее время об'ясняется потерей в массе четырех атомов водорода при уплотнении их в один атом гелия, при чем должна освобождаться значительная внутренняя энергия (Ланжевен, Эйнштейн). Аналогичная, хотя и менее значительная, потеря в массе может иметь место и в других случаях, вследствие чего нельзя утверждать, что атомные веса, выраженные относительно кислорода, должны быть совершенно целыми числами. Повидимому, Астон уже имел случай наблюдать незначительные расхождения. Можно сослаться на азот, атомный вес которого несколько больше 14; его ядро должно содержать в себе атомы или ядра водорода, что доказано опытами Рэтерфорда, которому удалось отщепить от этого элемента несколько таких ядер (лучи *H*) посредством энергичной бомбардировки альфа-лучами. Избыток в атомном весе азота можно об'яснить, допуская, что азотное ядро содержит в себе три ядра гелия, два ядра водорода и один электрон, при чем водородные ядра, повидимому, сравнительно слабее связаны с центральной частью.

Во всяком случае, мы можем считать элементами атомной структуры протон (водородное ядро), электрон и ядро гелия. Можно условиться называть последнее гелион, а вместо электрон, входящий в ядерную структуру, для краткости, говорить нуклеон. Говоря о строении того или иного элемента, мы, следовательно, имеем в виду группировку его ядра из электрона, водородного ядра и ядра или иона гелия. Условимся обозначать эти основные структурные единицы символически (например, буквами: *e*—электрон, β—нуклеон, α—гелион, ядро гелия и π—протон).

Что касается протона и электрона, то нам известны их массы и размеры, для гелиона мы знаем только массу. Зная отношение заряда к массе, применяя данные теории электромагнитной массы и предположив, что имеем дело с шарами радиуса r для внешнего поля заряда, получаем:

	Электрон.	Протон.
(*m*) масса	$9{,}0 \times 10^{-28}$ гр.	$1{,}6 \times 10^{-24}$ гр.
радиус	$1{,}9 \times 10^{-13}$ см.	$1{,}03 \times 10^{-16}$ см.

Масса гелиона известна по его атомному весу—$He = 4{,}00$, размеры же его зависят от внутреннего строения, которого мы не знаем. Пытались построить модель ядра гелия с помощью двух электронов и четырех протонов, вращающихся вокруг оси, образуемой электронами, однако, пользуясь такой моделью, мы сталкиваемся со значительными затруднениями, которые показывают, что даже в таком наиболее простом случае мы еще не можем подойти к вопросу о строении ядра.

§ 2. Сложность ядра

Ядра представляют собой соединения из указанных выше единиц строения; при образовании каждого ядра из таких единиц имеет место потеря энергии и массы, но меньшая, чем в случае уплотнения водорода в гелий.

За последние годы было предложено достаточно много схем для модели таких соединений, однако ни одна из них не находит себе серьезного основания. Некоторые авторы пытались ввести в число единиц строения ядро предполагаемого изотопа гелия с атомным весом 3, однако ничто не заставляет до сих пор допускать существование такого ядра, мысль о котором возникла одно время в связи с некоторыми опытами Резерфорда, результаты которых не получили подтверждения.

Среди электронов имеются такие, которые заключаются в ядрах, ядерные электроны, нуклеоны (символ β). Другие образуют наружные электронные слои (символ *e*). Именно эти последние, и только они, предопределяют физико-химические свойства атомов, за исключением явлений радиоактивности. Предполагается, что они распределяются последовательными слоями, обычно обозначаемыми буквами *K*, *L*, *M*, *N*, *O* и *P*, и несут различные запасы энергии в зависимости от работы, необходимой для их отщепления от атома. Число этих электронов в каком-либо атоме равно атомному номеру *N*; самыми наружными электронами предопределяются валентность, химические свойства и светоизлучение, в то время как более близкие к ядру электроны играют роль в образовании характеристических

X-лучей, свойственных атому. Повидимому, магнитные свойства атома зависят от той или иной симметрии в распределении электронов.

Числом нуклеонов предопределяются числовые значения атомного веса и атомного номера. Ядро элементов с атомным весом равным P состоит из P протонов, и если заряд ядра равен N положительным единицам, то нуклеонов в ядре должно быть $n = P - N$.

Для некоторых атомов, имеющих широкое распространение в природе, отношение n/p равно 0,5 (углерод, кислород и др.). Это отношение возрастает по мере увеличения P, оставаясь, однако, всегда меньше 0,6. Так как для значения P существует определенный предел (уран 238,2), то надо думать, что образование более массивных ядер наталкивается по существу на затруднения, препятствующие их устойчивости.

Неустойчивость, наблюдаемая у радиоэлементов, несомненно, связана с их высокими атомными весами, так как радиоэлементы занимают в периодической системе последние места; что же касается простой зависимости между массой и средней продолжительностью жизни того или иного радиоэлемента, то данных об этом у нас не имеется. Л. Мейтнер предполагает, что может играть некоторую роль сочетание, отвечающее атому гелия $(\alpha + 2\beta)$ в силу тех соображений, что выбрасывание альфа-частицы часто сопровождается выделением двух бэта-частиц. Можно также думать, что в радиоактивных ядрах предсуществуют в готовом виде определенные устойчивые ядра, например,

ядро уранового свинца 206 может быть структурной единицей ядер урана и всех его производных.

Хотя наши представления о структурных единицах основаны исключительно на данных в области радиоактивных превращений, но некоторые авторы считают возможным обобщить эти мысли, полагая, что их можно распространить и на область неактивных элементов: таким образом получается два ряда производных, один от урана, другой от тория, охватывающие всю периодическую систему. Эта гипотеза основывается на возможных типах распада тяжелых атомов, но оставляет в стороне вопрос об их образовании, которое, однако, должно иметь место в природе, потому что звездные туманности, повидимому, содержат только водород и гелий.

IV

Разделение изотопов

§ 1. Классификация способов, атомные веса и плотности

Методы, применяемые для разделения изотопов, все основаны на разницах в массе, которые наблюдаются в изотопной смеси. Следовательно, прежде всего следует различать физические и химические явления, зависящие от процессов, обусловливаемых зарядом ядра; т.-е. связанных с атомным номером. Далее мы будем различать явления, зависящие от общих свойств, т.-е. непосредственно связанные с массой (тяготение и центробежная сила), и явления, в которых масса действует на скорость молекулярного движения (диффузия и эффузия, необратимое

испарение). Наконец, разделение изотопов, вытекающее непосредственно из радиоактивных процессов.

Разберем вкратце понятие **коэффициента обогащения** для смеси из двух изотопов. Этот коэффициент определяется по Рэйлею (Rayleigh) следующим образом: пусть X и Y означают начальное относительное содержание в смеси, а, x и y—эти же содержания в измененной смеси, тогда относительные коэффициенты обогащения для двух изотопов будут:

$$S = \frac{x}{y} \times \frac{Y}{X} \quad \text{и} \quad r = \frac{y}{x} \times \frac{X}{Y}$$

Изменения относительного содержания определяют собой изменения среднего атомного или молекулярного веса M и изменения плотности D, что выражается формулами:

$$\Delta M = (m' - m)(r - 1) \frac{XY}{x + r} y$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta M}{M}$$

где m и m' означают относительные молекулярные веса для различных относительных содержаний изотопов.

По аналогии с наблюдениями, произведенными над свинцом, предполагается, что атомные об'емы изотопов в твердом или жидком состоянии одни и те же.

§ 2. Разделение радиоактивных изотопов

В смеси радиоактивных изотопов отделение производится автоматическим путем вымирания изотопов, обладающих короткой продолжительностью жизни и сохранением более долговечного изотопа. Таким образом в смеси радия и мезотория, получаемой технически из монацита, содержание радия по отношению к мезоторию с течением времени (годами) увеличивается, пока не наступит практически полное исчезновение мезотория.

Для некоторых радиоэлементов разделение обычных смесей их изотопов может быть осуществлено лишь в том случае, если в них не содержится обоих материнских веществ. Так, можно получить мезоторий без радия, исходя из очищенного тория, в то время как технический мезоторий всегда смешан с радием, так как монациты, из которых он получается, содержат одновременно и уран, и торий. Также и радий *D*, получаемый из радиоактивных минералов, всегда смешан со свинцом, но можно его получить и без свинца, если только он получается с особыми предосторожностями, как активный осадок эманации радия.

§ 3. Способы общего характера

a) Сила тяжести. Как пример, можно рассмотреть случай с газом, распределенным в атмосфере под действием силы тяжести и теплового движения. Хорошо известная формула барометрического распределения показывает, что градиент концентрации для изотопных газов

несколько различен, так что в газе. взятом на большой высоте, можно обнаружить несколько иное относительное содержание изотопов, чем на поверхности земли. Это было удачно использовано для двух изотопных неонов и позволило на высоте в 30 километров получить для их смеси средний атомный вес. равный 20,15 вместо обычного 20,20.

в) Центробежная сила. Действие центробежной силы в принципе аналогично действию силы тяжести, но при очень высоких скоростях вращения обнаруживается в несколько большей степени. Математические вычисления, связанные с этим случаем, значительно сложнее. Обычно рассматривают отдельно случаи газов и жидкостей.

Под действием центробежной силы молекулы газа отгоняются на крайнюю периферию трубки центрифуги, так что с этой стороны плотность газа увеличивается, в то время как со стороны оси она уменьшается; трубка предполагается закрытой. Одновременно имеет место частичное разделение изотопной смеси, так как центробежная сила, ограничиваемая молекулярным движением, оказывает более сильное действие на более тяжелые молекулы m', чем на более легкие m. Следовательно, имеет место обогащение молекулами m' у периферии и молекулами m у оси вращения. Найдено, что

$$r = e^{\frac{(m'-m)\ V2}{2RT}}$$

где r означает коэффициент обогащения молекулами m' от начала трубки к ее периферии, v—скорость на пе-

риферии, R— постоянная для идеального газа, T—абсолютная температура. Чтобы определить концентрации на двух концах, мной указан метод графического вычисления, дающий полное решение задачи; чтобы найти приближенно изменение в атомном весе в тех случаях, когда v получает наибольшее технически осуществимое числовое значение (от 10^4 до 10^{15} см. в секунду), можно пользоваться сокращенными формулами. Теория диффузии позволяет предусмотреть, что равновесие концентраций может быть достигнуто в достаточно короткое время, но операции, связанные с выделением части газа, не представляются легкими, и до сих пор все опыты этого рода не дали сколько-нибудь благоприятных результатов. Теория позволяет предвидеть отклонение атомного веса на 0,07 для неона и 0,14 для хлористоводородного газа при скорости v, равной 10^5 см. и при обыкновенной температуре.

В случае с жидкостями плотность остается почти постоянной для всех точек трубки; молекулы m' могут сконцентрироваться на периферии, только скользя между молекулами m и меняясь с ними местами. Поэтому вычисление осевых и периферических концентраций совсем иное, чем в случае с газами. Несмотря на это, формула, приведенная выше для газов, применима и к жидкостям, так как к вопросу о распределении молекул обоих видов m и m' можно приложить законы теории вероятностей. Однако в случае с жидкостями мы сталкиваемся с затруднением, проистекающим из медленности процесса; теория показывает, что для равновесия обыкновенно требуется

несколько суток. Повидимому, колебания центробежной силы и температуры способствуют возвращению смеси к ее обычному состоянию, даже когда она оказывается неоднородной в течение опыта. Опыты, произведенные над ртутью и расплавленным свинцом, до сих пор не привели к желаемому разделению (Джоли—Joly, Пуль — Poole и Миликэн—Millikan).

c) Тепловая диффузия. Когда газообразная смесь заключена в трубку, два конца которой поддерживаются при различных температурах, более тяжелые молекулы концентрируются в холодной области, а более легкие в теплой (Чапмен—Chapmen). Это явление, допускающее частичное разделение смеси водорода и углекислого газа, было предложено для разделения изотопов, но до сих пор еще не было опубликовано ни одного опыта поставленного по этому способу. Соображения теоретического характера говорят за то, что ожидать значительных результатов при опытах по этому способу не приходится.

d) Дробная перегонка и химическое действие. В тех случаях, когда имеет место ощутимая разница в давлениях насыщенных паров, можно надеяться на разделение изотопов посредством дробной перегонки. В силу этих соображений Астон выполнил весьма кропотливую дробную перегонку естественного неона, при чем никакого разделения не получилось. Теоретическое исследование этого способа произведено Линдеманом, который основывался на данных для соотношения между давлениями насыщенных паров, удельных теплот для газообразного

и сгущенного состояний и химических постоянных Нернста. Удельная теплота в сгущенном состоянии зависит от специфических периодов колебаний, меняющихся в зависимости от массы, если только предполагать, что силы сцепления у изотопов одинаковы. Исходя из предположений, основанных на химических постоянных или на нулевой энергии (энергии при абсолютном нуле), мы приходим к различным результатам; согласно одним из них можно ожидать небольшой разницы, в то время как другие приводят к равенству давлений насыщенных паров.

Данные опыта, повидомому, говорят в пользу второго решения, так как работы Астона над неоном не дали никакого результата, и, с другой стороны, многочисленные попытки добиться разделения путем химическим до сих пор оставались совершенно безуспешными. Можно указать на тысячу кристаллизаций, выполненных с изотопами свинца (Ричардсон—Richardson), а также на ряд работ, произведенных над радиоэлементами.

§ 4. Способы, основанные на молекулярном движении

Известно, что средняя энергия молекулярного движения одинакова у всех молекул при одинаковой температуре, при чем средняя скорость обратно пропорциональна квадратному корню из молекулярного веса; следовательно, она тем больше, чем легче молекулы. Таким образом должна существовать разница в средних скоростях изотопных молекул различных масс. На этом принципе

можно обосновать целый ряд способов отделения, но существенным условием такой операции должна быть необратимость, другими словами, используемое явление не должно компенсироваться обратным, вытекающим из той же самой причины. Например, при перегонке более быстрое испарение более легких молекул не должно компенсироваться более частым переходом их в жидкое состояние. В эту группу входят способы диффузии, эффузии, перегонки под низким давлением, скорости химической реакции. Этими способами можно добиться только частичных отделений, при чем тем большего, чем более различны скорости.

a) Диффузия жидкостей. Этот способ был применен для разделения урана I и урана II, двух изотопов, составляющих, как предполагают, уран. Подвергая диффузии раствор азотнокислого уранила при наличии избытка анионов, можно надеяться на преимущественное движение ионов содержащих Ur II (Lachs, Nadratowska, Wertenstein. Hevesy, Putnoky). Беря пробу жидкости с конца цилиндра, в котором протекает диффузия. можно определить и атомный вес, и радиоактивность продиффундировавшего урана. Этот опыт дал отрицательный результат. позволяющий заключить о равенстве коэффициентов диффузии с точностью до 0,5%.

Линдеман выполнил несколько важных теоретических исследований по вопросу об разделении изотопных ионов при различии их электролитических подвижностей. Неудачи вышеописанных попыток наводят на мысль. что и

в данном случае успех не будет большим; в самом деле, существует хорошо известная связь между коэффициентами подвижности и коэффициентами диффузии электролитов, и в случае, когда имеется значительный избыток анионов, эта связь сводится к простой пропорциональности.

в) Диффузия газов. Теория отделения газов по способу диффузии через пористую перегородку выражается следующей формулой, данной Рэйлеем (Rayleigh):

$$\frac{u}{V} = \frac{x}{u} r \frac{k_2}{k_2 - k_1} + \frac{Y}{u} r \frac{k_1}{k_2 - k_1}$$

где r означает указанный выше коэффициент обогащения: k_1 и k_2 — скорости диффузии двух изотопов; x и Y — их начальные об'емы, сумма которых выражена через V, и u — остаточный об'ем после истечения некоторого определенного количества газа. Если речь идет о молекулах, массы которых m^1, m^2 мало отличаются друг от друга, то можно воспользоваться следующей формулой:

$$r = \sqrt{\frac{q}{\frac{V}{u}}}$$

$$q = \frac{m^2 + m^1}{m^2 - m^1} .$$

Отношение под знаком корня представляет собой убыль об'ема. Числовые данные легко обнаруживают, что коэффициент обогащения может быть величиной значительной только при условии значительного изменения об'ема; действительно: показатель корня равен 21 в случае с неоном

и 37—с хлористоводородным газом. Таким образом, сразу видно, что операция представляется исключительно сложной.

Эти теоретические соображения предполагают, что два газа диффундируют независимо друг от друга и что их смесь совершенна. Первое из этих условий имеет место только в том случае, когда «средний путь» молекул велик по отношению к диаметру пор в перегородке (Knudsen). Это неосуществимо, вообще говоря, при давлениях, близких к атмосферному, и из этого вытекает изменение в самом ходе процесса разделения; однако Гаркинсу (Harkins) и Милликэну (Millikan) удалось установить для одного частного случая изотопных газов, что разделение при атмосферном давлении не должно быть непременно ниже того, какое получилось бы при малом давлении, и что скорость диффузии изотопа более легкого могла бы даже стать неблагоприятным фактором при большом его «среднем пути» молекул. Возможно, что наблюдаемый при высоких давлениях ход процесса зависит преимущественно от несовершенства смеси.

Способ диффузии смесей прежде всего был использован Астоном для разделения неона. Астон заставлял диффундировать через пористые трубки природный неон. Так как запас газа был ограниченным, то был применен метод фракционировки. После большого числа операций у последних фракций, тщательно очищенных, были измерены плотности, при чем получились атомные веса 20,15 и 20,28. Таким образом небольшое разделение было действительно осуществлено (1913 г.), правда, ценою весьма

большой затраты труда. Другая постановка опыта (1914 г.) дала отрицательные результаты, приписываемые автором аппарату, несмотря на его значительное усовершенствование в деталях: опыт велся под атмосферным давлением.

Гаркинс со своими ассистентами в течение целого ряда лет ставил опыты по диффузии хлористоводородного газа. Этот газ был избран для опытов потому, что его можно было иметь в неограниченном количестве, а задача заключалась по преимуществу в диффузии больших количеств, чтобы получить большое изменение объема. Вычисление показывает, что для получения разницы в атомном весе на 0.2 при одной операции с остатком в 1 гр. необходимо подвергнуть диффузии 130 тонн хлористоводородного газа или 36 тонн неона. Сообразно с намеченной трудной задачей, эти экспериментаторы устроили аппарат, который мог быть использован для диффузии 1000 литров газа в сутки под атмосферным давлением.

Хлористоводородный газ, выделенный из водного раствора действием серной кислоты и тщательно промытый, проходит в этом аппарате через пять пористых трубок: газ, продиффундировавший к концу этих трубок, уносится током воздуха. Как продиффундировавший, так и остаточный газы в конце операции поглощались водой; затем приготовлялся хлористый натрий, который подвергался тщательной очистке. Лучшие из полученных до сих пор результатов дали 5 гр. хлора с атомным весом 35,51, т.-е. на 0,05 единицы выше нормальной величины. Убыль объема, сопровождавшая этот результат, доходила до 8.000.

Отметим еще несколько других работ, относящихся к диффузии. Стэрн (Stern) и Вольмер (Vollmer) использовали этот способ в целях открытия изотопа водорода с массой 2, или изотопа кислорода, но эти исследования дали отрицательные результаты, что находится в полном согласии с аналогичными работами по способу спектра масс. Коольвэйлер (Kohlweiler) надеялся доказать существование изотопов иода и заставлял диффундировать иодные пары через целый ряд пористых пластинок, но анализ указывал только на один компонент с атомным весом 127.

Герц (Herz) применил способ диффузии в направлении против газового тока, который показал себя наиболее успешным при разделении гелия и неона, почему он и надеялся на такой же благоприятный результат при разделении изотопов. Наконец, нескольких авторов интересовала мгновенная диффузия, т.-е. выход легких молекул, образующих в некотором роде фронтовую линию диффузии с особенно высоким коэффициентом обогащения; зато абсолютное число этих молекул, конечно, должно быть очень небольшим.

c) Эффузия. Этот способ заключается в том, что газовую смесь, содержащуюся в приемнике, заставляют проходить через отверстие в тонкой перегородке в резервуар, где поддерживается очень низкое давление. К явлению эффузии можно применить теорию Рэйлея при условии, что газы проходят независимо друг от друга и смесь совершенна. Для этого необходимо, чтобы

средний путь молекул был достаточно большим по отношению к диаметру отверстия (Knudsen), Бронстед (Brønsted) и Гевези (Hevesy) применили этот способ к ртутным парам. Эти последние, получаемые с поверхности нагреваемой ртути, проходили в трубку, через которую проникали в резервуар (см. рис. 2), где они сгущались: в трубке было устроено оконце, закрытое платиновым листком с вырезанной в нем тысячей дырочек в 0,15 мм. в диаметре. Через эти дырочки некоторые из молекул попадали в боковую трубку, на дне которой и сгущаются. Плотность получаемой здесь ртути, измеренная с громадной точностью (от 1 до 2 миллионных долей грамма), оказалась слегка ниже нормальной; относительное уменьшение в плотности, равное около 13×10^{-6} хорошо согласуется с предварительным теоретическим вычислением.

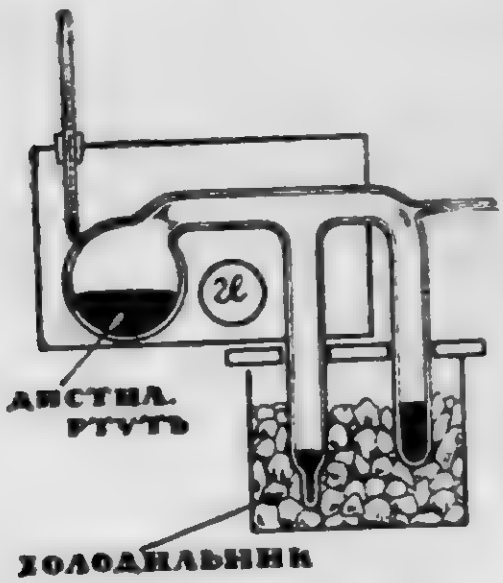


Рис. 2.

d) Необратимое испарение при низком давлении. Этот способ заключается в собирании молекул, отрывающихся от жидкой поверхности в таких условиях, что их возвращение на поверхность испарения невозможно, так что в данном случае отсутствует обычное при испарении обратимое соотношение между свободными молекулами паров и их сгущением на поверхности. Бронстед и Гевези разрешили эту задачу, осу-

ществляя испарение под низким давлением в отсутствии посторонних газов, и собирали испаренные молекулы на холодную стенку, на которой они сгущались (рис. 3). Для успешности такой операции требовалось, чтобы во время своего прохождения до холодной стенки молекулы не сталкивались с газом и тем самым не направлялись бы обратно. Кроме того, скорость испарения не должна быть слишком большой, чтобы поверхностное состояние жидкости оставалось постоянным, благодаря диффузии из более глубоких слоев.

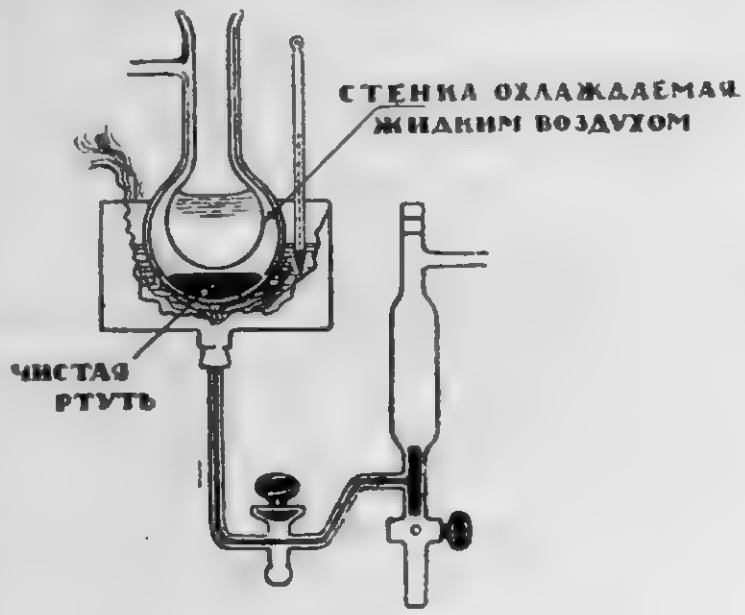


Рис. 3.

Этот способ был с успехом использован при испарении ртути; наибольшее полученное отклонение в плотности достигало 0,5 на 1.000 при убыли об'ема в 13.500. Такой же способ был применен к раствору хлористого водорода в воде при 50°; отклонение в атомном весе хлора составило в данном опыте 0,024-ую долю этого веса. Опыты со ртутью были предприняты целым рядом ученых (Harkins, Millikan и др.): они точно установили возможность разделения ее по этому способу. Теоретические данные совпадают с результатами опыта. Поверхность жидкости действует, как перепонка, позволяющая испа-

ряющимся молекулам проходить через междумолекулярные промежутки. Для разделения газов на изотопы этот способ может получить применение в связи с процессами обычной перегонки.

е) Скорости химической реакции. Дж. Дж. Томсон высказал предположение о возможности использования для разделения изотопов скоростей молекулярного движения, как фактора, определяющего химические реакции. Так, например, можно направить струю хлористого водорода в щелочный раствор, тогда более легкие молекулы должны поглощаться с большой легкостью и состав остатка может оказаться изменившимся; поставить такой опыт попытался Людлам (Ludlam) с отрицательным результатом: к такому же результату привели и попытки поглощения хлора аммиаком, получавшимся при разложении хлористого аммония.

Гевези указал на возможность опыта, состоящего в том, что струю хлора направляют в серебряную трубку в надежде на преимущественное поглощение Cl_{35}; опыт не был поставлен. Напомним попутно, что химические реакции до сих пор оказывались неприменимыми для разделения радиоэлементов. Поэтому надо думать, что весьма трудно осуществить условия, которые позволили бы использовать разницу молекулярных скоростей в моменты химических реакций. Кроме того, мы совершенно не знаем, каковы условия для того, чтобы столкновение молекул оказало бы действие и повело бы к химической реакции; самый эффект столкновения может быть функцией молекулярной скорости.

§ 5. Способ фотохимический

Мертон (Merton) и Гартлей (Hartley) предложили способ, основанный на поглощении молекулами инфракрасных лучей. Природный хлор составлен из трех видов молекул: Cl^2_{35}, Cl^2_{37}, Cl^2_{39} в относительном содержании 9 к 6 к 1. Заставляя свет различных периодов колебаний поглощаться этими тремя видами молекул можно думать, что после прохождения светом достаточной толщи этого газа уменьшится интенсивность лучей, отвечающих поглощению молекулами Cl^2_{35} по сравнению с интенсивностью лучей, поглощенных молекулами Cl^2_{37}. Фильтруя таким образом свет через смесь из хлора и водорода, можно рассчитывать на преимущественное образование HCl_{37}, а при благоприятных условиях можно добиться и полного разделения. Опыт совершенно не оправдал этих предположений, и надо сказать, что задача заключает в себе большую долю неизвестности относительно предполагаемых периодов колебаний и их роли в химических реакциях

§ 6. Положительные лучи

Самый заманчивый способ разделения изотопов состоит в применении аппарата, служащего для получения спектра масс. При условии отдельного поглощения молекул в каждой точке получаемого изображения на фотографической пластинке, или еще лучше—поглощения при проникновении их в приемную электрометрическую камеру, и то и другое—при определенном потенциале. Значительным преимуществом этого способа является возможность полного раз-

деления. Предположения, высказываемые по этому вопросу Астоном, далеко не безнадежны; этот ученый подсчитал, что при нормальной работе его трубки можно будет получить в 100 секунд 0,1 мм. куб. Ne_{20} и 0,01 мм. куб. Ne_{22}; но он думает, что при опыте могут возникнуть не малые затруднения. Однако, результат может быть иным для элементов более легких или обладающих в противоположность неону химическим сродством (ртуть или золото и др.); может быть, можно добиться усиленного образования лучей в трубке спектрографа масс или осуществить задачу с помощью установки для анодных лучей. Повидимому, разочаровываться в этом способе нет еще никаких оснований.

V

Заключение

Мы видим, как теоретические соображения крупных ученых, подкрепленные важными достижениями в области экспериментальных исследований, привели к серьезно обоснованному общему понятию об изотопии химических элементов. Мы являемся свидетелями одного из грандиозных и быстро завершенных открытий новых горизонтов в современной физической химии, которая за последнее время приучила нас к удивительным успехам. Изотопия, как таковая, установлена, возможности разделения изотопов также доказаны, хотя достигнутые результаты пока и незначительны. Постоянство относительного содержания изотопов в естественных изотопных смесях является фактом.

заслуживающим наибольшего внимания, потому что он находится в тесной связи с отдаленным прошлым нашей планеты. Несомненно, что образование этих смесей было подчинено определенным законам, следствием которых и явилось это замечательное постоянство. Но если человеческими усилиями, при ограниченности средств, удалось получить частичное разделение изотопов, как можно не задумываться над тем, почему природа, располагающая многими могущественными средствами и таким важным фактором, как время, не может сама, в известных условиях, осуществить частичное,—а возможно и полное,—их разделение. Вот чем об'ясняется и почему возрастает интерес химиков к точным определениям атомных весов. Хотя они оказались лишь условным и преходящим обозначением, как мы в этом недавно убедились, но это не устраняет наших стремлений применить к их определению наиболее точные методы, которые, наравне с методами тщательной очистки, приобретают значение в связи с новыми вопросами о происхождении всего вещества, подвластного опыту. Эта новая задача, будущее разрешение которой несомненно приведет к важным выводам, стоит непосредственно перед современными лабораториями, и их сложная и часто утомительная работа уже позволила нам сделать широкие обобщения, послужившие содержанием этой статьи.

Перевод В. П. Федорова.

СОДЕРЖАНИЕ.

		Стр.
От редактора		3
Жан Перрэн.	**Мария Кюри и открытие радия**	13
Мария Кюри.	**Открытие радия**	27
„ „ „	**Эталон радия**	48
„ „ „	**Радиоактивность и сходн. с ней явления**	61
	I. **Открытие радиоэлементов**	61
	Отделение радиоэлементов	62
	Степень радиоактивности	62
	Природа радиоактивных излучений	63
	Свойства лучей	70
	II. **Радиоактивные превращения**	71
	III. **Серия опытов**	80
„ „ „	**Изотопия и изотопы.**	
	I. **Изотопия у радиоэлементов.**	
	§ 1. Периодическая система элементов	83
	§ 2. Семейства радиоэлементов	86
	§ 3. Химия и электрохимия радиоэлементов	91
	§ 4. Группы изотопных радиоэлементов	95
	II. **Положительные лучи и анализ масс.**	
	§ 1. Получение и свойства положительных лучей	98

Стр.

§ 2. Метод парабол 101
§ 3. Измерение атомных и молекулярных масс. Параболы неона 103
§ 4. Спектрограф масс 106
§ 5. Анодные лучи 109
§ 6. Результаты наблюдений 111
§ 7. Постоянство химич. атомных весов 115
§ 8. Статистические соотношения между изотопами. Виды изотопии 116
§ 9. Спектр изотопов 118

III. **Строение атомов.**

§ 1. Единицы вещества — элементы строения 119
§ 2. Сложность ядра 122

IV. **Разделение изотопов.**

§ 1. Классификация способов, атомные веса и плотности 124
§ 2. Разделение радиоактивных изотопов. 126
§ 3. Способы общего характера 126
§ 4. Способы, основанные на молекулярном движении 130
§ 5. Способ фотохимический 139
§ 6. Положительные лучи 139

V. **Заключение** 140

Цена 60 коп.

5883

Адрес издательства
Кузнецкий мост, 13. Тел. 4-82-73

Адреса магазинов
№ 1: Столешников, 5. Тел. 3-56-83
№ 2: Никольская, 12. Тел. 2-85-32

Центральный книжный склад
Лубянский пассаж, пом. 25—30
Тел. 3-45-04